

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

ІНЖЕНЕРНО – ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

«На правах рукопису»

УДК [678.027.3+678.057.3]:678.073

«До захисту допущено»

В. о. завідувача кафедри

Гондляр О.В.

(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

на тему: Моделювання процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера

Виконав: студент 2 курсу, групи ЛП-81мн
(шифр групи)

Бардашевський Сергій Валерійович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник проф., д.т.н. Мікульонок І.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з математичного моделювання
д.т.н., проф. Карвацький А.Я. _____
(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет інженерно-хімічний
Кафедра хімічного, полімерного та силікатного машинобудування
Рівень вищої освіти другий (магістр)
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри
О.В. Гондлях

«__» _____ 2019 р

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Бардашевський Сергій Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: «Моделювання процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера»

науковий керівник дисертації Мікульонюк Ігор Олегович д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «13» березня 2019 р. № 881-с

2. Строк подання студентом дисертації: 16 травня 2019 р.

3. Об'єкт дослідження: процес живлення гранульованою полімерною сировиною черв'ячного екструдера. _____

4. Предмет дослідження: параметри руху гранульованого полімерного матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: уточнити параметри математичної моделі руху сипучого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера; створити методику та експериментальну установку для проведення досліджень фізико-механічних властивостей гранульованих матеріалів для різних умов руху; експериментально дослідити режими тертя гранульованих полімерних матеріалів по металевій поверхні; експериментально дослідити коефіцієнту бокового тиску; змодельовати вплив форми гранул на коефіцієнт внутрішнього тертя; дослідити процесу руху полімеру в зоні живлення екструдера; провести числове моделювання процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера. _____

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: плакати, що включають: загальну характеристику дисертації, математичні моделі руху сипких гранульованих матеріалів, дослідна установка, методика експериментів, результати експериментів, моделювання форми гранул на внутрішній коефіцієнт тертя, числове моделювання процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера _____

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття у науковому фаховому виданні України, два патенти України на корисні моделі, чотири тези доповіді на науково-технічних конференціях.

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз літературних і патентних джерел з проблематики дисертації. Формулювання завдань досліджень.	31.12.17	
2	Підготовка розділу 1 дисертації, тез 1 на конференцію	13.03.18	
3	Підготовка розділу 2 дисертації	31.05.18	
4	Підготовка і подача заявки на патент 1	05.10.18	
5	Підготовка і подача заявки на патент 2	24.10.18	
6	Проведення досліджень, підготовка і подача статті	20.11.18	
7	Підготовка розділу 3 дисертації, тез 2 на конференцію	31.11.18	
8	Підготовка стартапу проекту, охорони праці, тез 3 на конференцію	31.12.18	
9	Підготовка розділу 4 дисертації, тез на конференцію	28.02.19	
10	Підготовка розділу 5 дисертації	31.03.19	
11	Підготовка розділу 6 дисертації, формулювання висновків	20.04.19	
12	Оформлення дисертації	10.05.19	

Студент _____
(підпис)

С.В. Бардашевський
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації _____
(підпис)

І.О. Мікульонок
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

УДК 531.46:678.073.001.891.5

Магістерська дисертація на тему: «Моделювання процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера» / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»; Керівник Мікульонок І. О. – К., 2019. – 144 с.: іл. – 64. Виконавець Бардашевський С.В. – Бібліогр.: 42 п.

Робота складається з переліку умовних позначень, вступу, шести розділів, висновків, переліку посилань та додатків. Повний обсяг роботи становить 146 сторінки, 64 рисунки, 48 таблицю і перелік посилань з 42 найменувань на 5 сторінках.

Об'єкт дослідження – процес живлення гранульованою полімерною сировиною черв'ячного екструдера.

Предмет дослідження – параметри руху гранульованого полімерного матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера.

Мета дослідження – є дослідження коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску гранульованих матеріалів у черв'ячних машинах, розрахунок масової продуктивності та числове моделювання процесу живлення екструдера.

У роботі представлено результати експериментальних та числових досліджень процесу живлення черв'ячного екструдера. Отримано залежності тертя гранульованого полімерного матеріалу по металевій поверхні робочих органів екструдера та залежності коефіцієнту бокового тиску від, температури, швидкості, тиску та висоти шару гранул а також створено експериментальну установку для проведення досліджень.

Матеріали магістерської дисертації викладено у 7 публікаціях (2 деклараційних патенти України на корисну модель, 1 у науковому фаховому виданні України, 4 тез доповідей на конференціях.).

полімер, гранула, екструдер, металева поверхня, тертя, навантаження, температура, швидкість, залежність

THE ABSTRACT

UDK 531.46:678.073.001.891.5

The Master's Diploma project thesis on a theme: « Bulk material movement process modeling of in the feed zone of extruder » / NTUU "Ihor Sykorskyi KPI"; Supervisor I. Mikulionok. – K., 2019. – 144 p.: ill. – 64. Executor S. Bardashevskyi - Bibliog.: 42 r.

The Master's Diploma consists of a list of references, symbols, indexes, an introduction, fix chapters, conclusions, references and applications. The total volume is 146 pages, 64 drawings, 48 tables and a list of references from 42 names on 5 pages.

The object of research is process of feeding polymeric granulated material in extruder.

The subjects of research are movement parameters of granulated polymeric material in the feeding zone of extruder.

The objective of the diploma project is an investigation of friction coefficient and lateral pressure coefficient granulated material in screw extruder.

The dissertation presents experimental and numerical investigations the process of feeding screw extruder. The dependencies of polymeric granulated materials friction by metallic extruders surfaces and dependencies of lateral pressure coefficient from temperature, speed, pressure and height of granules layer were got. Also experimental apparatus was made.

The materials Master's Diploma project is contained in 7 publications (2 patents of Ukraine for utility model, 1 the professional scientific publication of Ukraine, 4 theses reports on the conferences).

polymer, granule, extruder, metal surface, friction, load, temperature, speed, dependence

РЕФЕРАТ

УДК 531.46:678.073.001.891.5

Магистерская диссертация на тему: «Моделирование процесса движения сыпучего материала в зоне загрузки червячного экструдера» / НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»; Руководитель Микулёнок И. О. – К., 2019. – 144 с.: ил. – 64. Исполнитель Бардашевский С.В. – Библиогр.: 42 п.

Работа состоит из списка условных обозначений, введения, шести разделов, выводов, перечня ссылок и приложений. Полный объём работы составляет 146 страницы, 64 рисунка, 48 таблицу и перечень ссылок из 42 наименований на 5 страницах.

Объект исследования – процесс питания гранулированным полимерным сырьём червячного экструдера.

Предмет исследования – параметры движения гранулированного полимерного материала в зоне питания червячного экструдера.

Цель исследования – исследование коэффициента трения и коэффициента бокового давления гранулированных материалов в червячных машинах, расчет массовой продуктивности и числовое моделирование процессу питания экструдера.

В работе представлено результаты экспериментальных и числовых исследований процесса питания червячного экструдера. Получены зависимости трения и коэффициента бокового давления гранулированного полимерного материала по металлической поверхности рабочих органов экструдера от давления, температуры, скорости и высоты слоя гранул.

Материалы магистерской диссертации изложены в 7 публикациях (2 декларационных патентах Украины на полезную модель, 1 в научном профессиональном издании Украины, 4 тезиса доклада на конференциях).

полимер, гранулы, экструдер, металлическая поверхность, трение, нагрузка, температура, скорость, зависимость

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів і індексів.....	4
Вступ.....	3
1 Аналітичний огляд стану питання.....	7
1.1 Методи виготовлення полімерних виробів	7
1.2 Різновиди екструдерів	8
1.3 Функціональні зони процесу екструзії	10
1.4 Зона живлення черв'ячного екструдера	11
1.5 Дослідження коефіцієнтів тертя полімерних матеріалів	13
1.6 Огляд математичної руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера	22
1.7 Висновки до розділу 1	26
2 Математична модель дискретного опису руху сипучого матеріалу.....	27
2.1 Постановка задачі рухомого шару сипучого матеріалу.....	27
2.2 Висновки до розділу 2	31
3 Експериментальне дослідження коефіцієнтів тертя гранульованих полімерних матеріалів	32
3.1 Експериментальна установка.....	32
3.2 Методика проведення експериментів	34
3.3 Результати експерименту	37
3.3.1 Результати експерименту для полістиролу.....	37
3.3.2 Результати експерименту для поліетилену високої густини	39
3.3.3 Результати експерименту для полівінілхлориду	41
3.3.4 Результати експерименту для севілену	42

Змн.	Лист	№ докum.	Підпис	Дата				
Розроб.		Бардашевський			Моделювання процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера	Літ.	Арк.	Акцшів
Перевір.		Мікульонок					1	
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського		
Н. контр.								
Затверд.								

3.4	Графічні залежності	44
3.4.1	Графічні залежності коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску для полістиролу	44
3.4.2	Графічні залежності коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску для поліетилену високої густини	47
3.4.3	Графічні залежності коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску для севілену	50
3.4.4	Графічні залежності коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску для ПВХ	53
3.5	Оцінка достовірності рівнянь регресії	57
3.5.1	Розрахунок похибки результатів рівняння регресії для полістиролу	57
3.5.2	Розрахунок похибки результатів рівняння регресії для ПВГ	59
3.5.3	Розрахунок похибки результатів рівняння регресії для ПВХ	61
3.5.4	Розрахунок похибки результатів рівняння регресії для севілену	63
3.6	Вимірювання параметрів процесу	65
3.6.1	Розрахунок похибок вимірювань фізичних величин	68
3.6.2	Розрахунок похибки вимірювання динамометром	69
3.6.3	Розрахунок похибки вимірювання температури	71
3.6.4	Розрахунок похибки вимірювання швидкості обертання	73
3.7	Висновки до розділу 3	75
4	Моделювання впливу форми гранули на коефіцієнт внутрішнього тертя .	76
4.1	Програмне забезпечення	76
4.2	Визначення коефіцієнту внутрішнього тертя для гранул різної форми	76
4.3	Аналіз отриманих результатів	84
4.4	Дослідження процесу транспортування полімеру в екструдері	85

4.5	Числове моделювання процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера	88
4.6	Висновки до розділу 4	92
5	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	94
5.1	Загальні питання техніки безпеки	94
5.2	Електробезпека.....	94
5.3	Термічні опіки	96
5.4	Повітря робочої зони	96
5.4.1	Поліетилен.....	97
5.4.2	Поліпропілен	98
5.4.3	Полівінілхлорид.....	98
5.4.4	Полістирол і його співполімери	99
5.5	Освітленість робочого місця.....	100
5.6	Пожежна небезпека.....	101
5.7	Висновки до розділу 5	102
6	Розроблення стартап-проекту	103
6.1	Опис ідеї проекту	103
6.2	Технологічний аудит ідеї проекту.....	104
6.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	104
6.4	Розроблення ринкової стратегії проекту	111
6.5	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	113
6.6	Висновки до розділу 6	116
	Перелік посилань.....	119
	ДОДАТКИ.....	124
	Додаток А Науково-технічні досягнення	124
	Додаток Б метод найменших квадратів	131
	Додаток В Розрахунок коефіцієнтів регресії.....	132

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І ІНДЕКСІВ

Умовні позначення

c – масова теплоємність, Дж/(кг·К);

D – діаметр черв'яка, м;

e – ширина гребня нарізки черв'яка, м;

G_M – масова продуктивність, кг/с;

h – висота каналу черв'яка, м;

L – довжина, м;

$n_{\text{ч}}$ – частота обертання черв'яка, об/с;

p – тиск, Па;

q – поверхнева густина теплового потоку, Вт/м²;

q_V – об'ємна густина теплового потоку, Вт/м³;

r, θ, z – циліндричні координати;

R – радіус, м;

s – крок гвинтової нарізки черв'яка, м;

S – площа, м²;

t – час, с;

T – температура, °С;

w, W – лінійна швидкість, м/с;

x, y, z – декартові прямокутні координати;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

δ – товщина, м;

λ – теплопровідність, Вт/(м·К);

ρ – густина, кг/м³;

$\varphi_{\text{ч}}$ – кут підйому гвинтової нарізки черв'яка, рад.

Основні індекси

\max – стосується максимального значення;

\min – стосується мінімального значення;

0 – стосується початкового значення;

M – стосується маси;

st – стосується стінки черв'яка й циліндра;

$ч$ – параметр біля стінки черв'яка;

$ц$ – параметр біля стінки циліндра;

π – стосується полімеру;

x, y, z – складові декартової системи координат.

ВСТУП

Актуальність теми. Кожного року світовий ринок полімерної продукції зростає і не прогнозується тенденції на його спад. Вироби з полімерів мають дуже широку номенклатуру продукції: від речей побуту, з якими ми зустрічаємося щодня, до відповідальних деталей космічної техніки. Тому є важливим дослідження властивостей полімерних матеріалів на всіх етапах життєвого циклу: від полімерної гранули до готового виробу і закінчуючи утилізацією. Завдяки таким дослідженням відкриваються нові полімери, їх структури які дають змогу знайти їм нове застосування, а також з'являється можливість більш детально розглянути поведінку полімеру на етапах його переробки у вироби.

Одним із найпоширеніших методів переробки полімерних матеріалів у вироби – є метод екструзії, що здійснюється на черв'ячному устаткуванні. Успішне проектування та розрахунки нового черв'ячного обладнання у значній мірі залежить від точності врахування величин і співвідношення сил тертя, що діють на границях контакту матеріалу з циліндром та черв'яком, які в поєднанні з іншими параметрами визначають конструкцію черв'яка, тиск і температурний режим переробки, продуктивність і витрати потужності та відіграють принципову роль як засіб, що створює умови для переміщення та нагрівання матеріалу. Тертя також суттєво впливає на інтенсивність зношування робочих органів, оскільки від нього залежить шлях матеріалу, що перероблюється, та швидкість його переміщення.

До найважливіших параметрів експлуатаційних режимів тертя відноситься вплив навантаження, температури та швидкості. Для визначення коефіцієнтів тертя полімерного матеріалу по різних поверхнях проводять натурні експерименти, при цьому, зазвичай, коефіцієнти тертя полімерних матеріалів вимірюють по суцільному зразку, нехтуючи взаємодією між окремими частинками. Однак в зоні живлення черв'ячних екструдерів полімер найчастіше

перебуває у вигляді твердих гранул, які можуть проковзувати, перекочуватись одна по одній, деформуватися і т. д., що впливає на рух матеріалу відносно робочих органів екструдера. Таким чином, дослідження руху саме гранульованих полімерних матеріалів у зоні живлення черв'ячних екструдерів є актуальним завданням, оскільки отримані дані дозволяють проводити більш точні розрахунки обладнання для переробки полімерних матеріалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно до плану науково-дослідної роботи кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування і відповідає напрямку наукових досліджень Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”. Дослідження пов'язані з науково дослідною темою “Моделювання та удосконалення конструкційних матеріалів, технологічних процесів і хімічного обладнання”, номер державної реєстрації 0115U005592.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску гранульованих матеріалів у черв'ячних машинах, розрахунок масової продуктивності та числове моделювання процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера. Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

- Уточнення фізико-механічних параметрів математичної моделі руху сипкого матеріалу в зоні живлення одночерв'ячного екструдера;
- створення методики та експериментальної установки для проведення досліджень фізико-механічних властивостей гранульованих матеріалів для різних умов руху;
- експериментальне дослідження режимів тертя гранульованих полімерних матеріалів по металевій поверхні;
- експериментальне дослідження коефіцієнту бокового тиску.

Об'єктом дослідження є процес руху гранульованою гранульованого сипкого полімерного матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера.

Предметом дослідження є параметри руху гранульованого полімерного матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера.

Методи досліджень. Теоретичний аналіз процесів у зоні живлення черв'ячного екструдера, експериментальні дослідження процесів руху полімерних гранул у зоні живлення екструдера; статистичний аналіз дослідних даних; визначення функціональних залежностей і достовірності регресійних моделей.

Достовірність результатів досліджень і обґрунтованість теоретичних положень і практичних рекомендацій по роботі підтверджується задовільною збіжністю теоретичних і експериментальних даних, отриманих з використанням сучасних методик і аналітичної апаратури.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Експериментально встановлено залежності тертя гранульованого полімерного матеріалу по робочих поверхнях органів екструдера від тиску, температури швидкості та висоти шару гранул; дослідження проводились для таких чотирьох типів полімерних гранул: поліетилену високої густини марки 15803-020 (ГОСТ 16337–77), сополімеру етилену з вінілацетатом (севілену) марки 11104-030 (ТУ 6-05-1636–97), полівінілхлориду SorVyl G 2171/9005 11/01, полістиролу марки ПС-С-1-3 (ГОСТ 20282–86).
- Експериментально встановлено залежності коефіцієнту бокового тиску полімерного матеріалу по робочих поверхнях органів екструдера від тиску, температури, швидкості та висоти шару гранул;
- Досліджено залежність впливу форми гранул на коефіцієнт внутрішнього тертя.
- Уточнено параметри математичної моделі процесів у зоні живлення черв'ячного екструдера із урахуванням специфіки фрикційного режиму руху гранульованих полімерних матеріалів;

Практичне значення одержаних результатів: Створено експериментальну установку для визначення величини коефіцієнта тертя та коефіцієнта бокового тиску гранульованого матеріалу та розроблено методику

відповідних досліджень. Технічні рішення захищені патентами України на корисні моделі № 132798 та № 133176.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертації одержані здобувачем. Результати досліджень, виконаних у співавторстві, одержані при безпосередній участі здобувача на всіх етапах роботи.

Особистий внесок здобувача полягає в постановці мети й задач дослідження, проведенні аналітичного огляду літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень та виконанні числових розрахунків, співставленні теоретичних і дослідних даних, участі в розробці методики досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи були представлені на: VI-й, VIII-й Всеукраїнській науково-практичній конференції “Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки” (Київ, 2017, 2018 рр.); V Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві» (Суми 2018 р.), науково-практична конференція «Європейська наукова платформа» (Німеччина, Дрезден, 23 січня 2019).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено у 7 опублікованих працях, у тому числі 2 деклараційних патентах України на корисну модель, 1 статті у фаховому виданні України та 4 тез доповідей на конференціях.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається із переліку умовних позначень, вступу, шести розділів, загальних висновків, переліку посилань та додатків. Повний обсяг дисертації становить 144 сторінки, 64 рисунки, 48 таблиці і списку літературних джерел з 42 найменувань (на 5 сторінках), перелік умовних позначень на 2 сторінках, додатки на 12 сторінках.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ

1.1 Методи виготовлення полімерних виробів

Для виготовлення певного полімерного виробу можуть бути використані різноманітні методи та технології, що сильно відрізняються одна від одної. Виходячи з цього, необхідно робити вибір найбільш оптимального методу виготовлення потрібного полімерного виробу. Розглянемо більш детально найбільш розповсюджені технології виробництва полімерних виробів:

1. Екструзія – за допомогою цього методу оптимальним вважається виготовлення так званих профільних полімерних виробів (труби, профілі, стрічки, плівки). Такі вироби отримують за допомогою екструдерів шляхом продавлювання матеріалу через формувальний інструмент – головку, що визначає геометрію та розміри виробу.

2. Екструзія з подальшим роздувом – ця технологія використовується для отримання різної пластикової тари (флакони, пляшки, банки).

3. Вакуумне формування – цим методом можна виготовити полімерні вироби із листових матеріалів. Наприклад таким методом можна виготовити пластиковий посуд, ванночки, плафони світильників та інші вироби, що мають однакову товщину по всій поверхні виробу.

4. Лиття під тиском – за допомогою даної технології можна отримати абсолютно будь-які вироби із пластмаси. Оптимальними виробами для даної технології вважаються вироби з високою щомісячною потребою. Річ у тім, що дана технологія вимагає досить високих затрат для виготовлення оснастки, але дозволяє виготовляти вироби високої точності в будь-яких кількостях.

За даними [28] методом екструзії виготовляється більше половини всіх пластмасових виробів, тому детальніше розглянемо різновиди екструдерів та процеси, що відбуваються при екструзії.

1.2 Різновиди екструдерів

Екструдер – машина для пластикації (розм'якшення) матеріалів і придання їм форми шляхом продавлювання крізь формуючий інструмент (екструзійну головку), поперечний переріз якого відповідає конфігурації виробу.

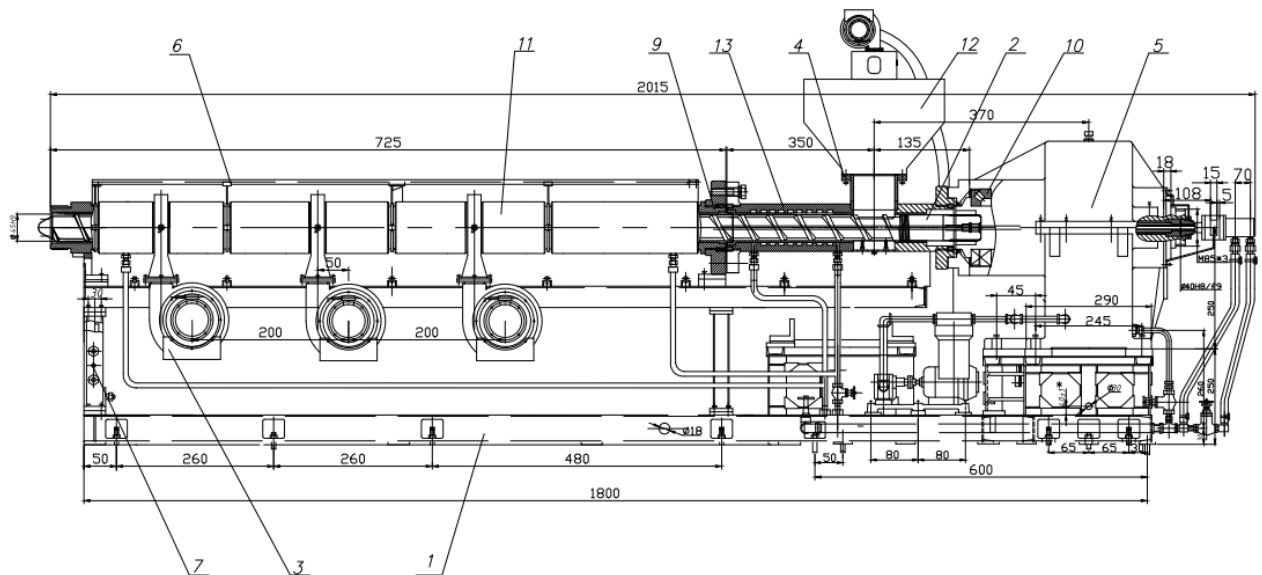
За допомогою екструдерів головним чином виготовляють вироби з термопластичних полімерних матеріалів, також їх застосовують при переробці гумових сумішей. Основними продуктами, що виготовляються методом екструзії є: труби, плівки, шланги, листи, вироби різного профілю, також наносять покриття на тканину, фольгу, картон чи папір та ізоляційне покриття на кабелі і дроти.

У залежності від перероблюваного матеріалу та виробу, що виготовляється, до екструдера ставляться різні вимоги, тому було розроблено різні конструкції екструдерів, а саме:

- дискові;
- одночерв'ячні;
- поршневі;
- двочерв'ячні / багатчерв'ячні;
- планетарні та ін.

Найбільшу популярність отримав одночерв'ячний екструдер (рис. 1.1) через простоту конструкції, універсальність та надійність.

Одночерв'ячний екструдер (рис. 1.1) працює наступним чином: під час обертання черв'яка матеріал транспортується гвинтовим каналом, утвореним внутрішньою поверхнею циліндра і нарізкою черв'яка. Одночасно в пресі відбуваються різноманітні процеси: нагрівання матеріалу за рахунок енергії дисипації та енергії, що підводиться від системи нагрівання циліндра, змішування компонентів, вилучення з матеріалів газоподібних та інших домішків.



- 1 – станина; 2 – черв'як; 3 – вентилятор; 4 – фланець воронки;
 5 – редуктор; 6 – кожух; 7 – стійка; 8 – привід редуктора; 9 – фланець;
 10 – опорний підшипник; 11 – корпус; 12 – бункер завантажувальний;
 13 – оболонка охолодження

Рисунок 1.1 – Одночерв'ячний екструдер

У зоні живлення відбувається прийом матеріалу, що переробляється, і його переміщення в напрямку зони плавлення й ущільнення. Для підвищення продуктивності зона завантаження виконується з великим об'ємом гвинтового каналу черв'яка.

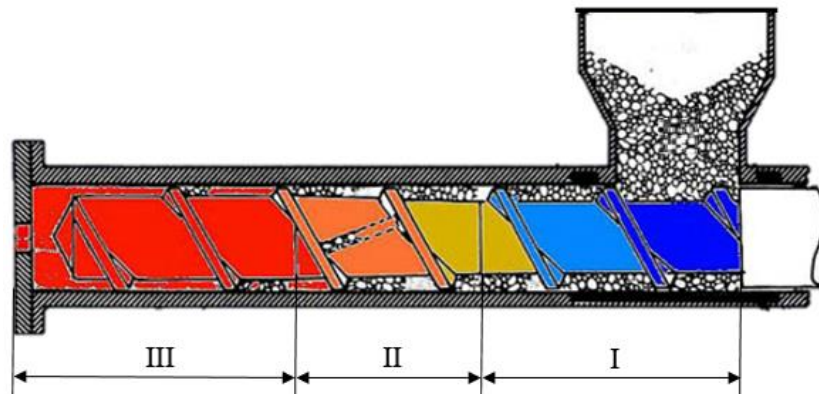
У зоні плавлення відбувається розплавлювання полімеру, його ущільнення і дегазація. Для ефективного проведення зазначених процесів канал черв'яка в зоні плавлення виконується з поступово зменшуваним об'ємом, що досягається в більшості випадків зменшенням глибини каналу, кроку гвинтової лінії чи обох параметрів одночасно.

У зоні дозування відбувається перемішування розплаву і генерується тиск, під дією якого розплав продавлюється крізь формуючий інструмент.

1.3 Функціональні зони процесу екструзії

Функціональними зонами процесу екструзії є (рис. 1.2):

- перша зона – зона живлення;
- друга зона – зона пластикації;
- третя зона – зона дозування.



I – зона живлення, II – зона пластикації, III – зона дозування

Рисунок 1.2 – Схема одночерв'ячного екструдера з позначенням функціональних зон процесу екструзії

Розглянемо що відбувається в кожній із функціональних зон.

Із завантажувального бункера матеріал у вигляді гранул подається у зону живлення. Тут полімер знаходиться у твердому стані та просувається вздовж циліндра за рахунок сил тертя.

У зоні пластикації полімер розплавляється і ущільнюється. Для ефективного розплавлення та ущільнення канал черв'яка в зоні пластикації виконується з поступовим зменшуванням об'єму, що досягається зменшенням глибини каналу, кроку гвинтової лінії чи поєднання цих параметрів.

Після цього полімер потрапляє в зону дозування, де закінчується процес плавлення, матеріал гомогенізується. У цій зоні суттєво зростає тиск, під дією

якого розплав продавлюється крізь формувальну головку, у якій полімер приймає форму виробу.

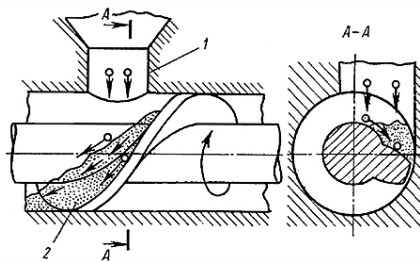
Довжина функціональних зон може варіюватися в значних межах залежно від перероблюваного матеріалу і технології переробки. Потрібно зауважити, що реально процес екструзії відбувається безперервно, плавно переходячи від однієї зони до іншої. Це означає, що існують перехідні області між цими зонами.

Ефективність роботи екструзійних машин в першу чергу визначається процесами, що проходять у зоні завантаження та зоні пластикації. При цьому продуктивність процесу екструзії безпосередньо залежить від продуктивності зони завантаження, оскільки для повного заповнення міжвиткового об'єму черв'яка полімером необхідно, щоб продуктивність зони живлення була більшою за продуктивність зони пластикації, а зона пластикації – більшою за продуктивність зони дозування [12].

У наступному розділі розглянемо детальніше процеси зони живлення.

1.4 Зона живлення черв'ячного екструдера

Вихідна сировина для екструзії, що подається до завантажувальної лійки 1 (рис. 1.4), може бути у вигляді порошку, гранул, стрічок. Останній вид сировини характерний для переробки відходів промисловості плівок. Найбільшої популярності, як сировина для екструдера, здобули гранули. Просувається матеріал вздовж циліндра гвинтовою поверхнею черв'яка 2 за рахунок сил тертя [27].



1 – завантажувальна лійка; 2 – черв'як

Рисунок 1.3 – Рух матеріалу на початку зони живлення

На кінці циліндра встановлена формуюча головка, що перешкоджає вільному просуванню матеріалу, що в свою чергу створює тиск і ущільнює матеріал у циліндрі.

Зі зростанням тиску і ущільненням матеріалу зростає і сила тертя що виникає між гранулами, гранулами та циліндром, гранулами та черв'яком. Різниця між силами тертя що виникають між матеріалом та циліндром – матеріалом та черв'яком є основною силою, що просуває ущільнений твердий матеріал.

Продуктивність зони живлення та черв'ячного екструдера в цілому, залежить від співвідношення сил тертя полімерного матеріалу об черв'як і циліндр, що, у свою чергу, залежать від площ поверхонь черв'яка і циліндра, які контактують з пробкою, а також коефіцієнтів тертя об черв'як і стінку циліндра [22]. З метою збільшення продуктивності намагаються збільшити коефіцієнт тертя між матеріалом та циліндром, а між матеріалом і черв'яком – зменшити.

Для створення високопродуктивного обладнання необхідно проводити теоретичні дослідження процесів, що відбуваються у екструдері, серед яких є дослідження поведінки полімерних гранул у зоні завантаження.

Процеси, що відбуваються у зоні живлення черв'ячного екструдера, впливають на значення коефіцієнтів тертя, що також впливає на розподіл сил тертя і процес подачі полімерного матеріалу. Тому від того, як точно враховуються величин і співвідношення сил тертя, залежить успішність розрахунків та проектування нового обладнання. Також тертя впливає на інтенсивність зношування робочих органів екструдера, оскільки від тертя залежить шлях, швидкість та переміщення полімерного матеріалу.

Розглянемо різні методи дослідження коефіцієнтів тертя полімерних матеріалів.

1.5 Дослідження коефіцієнтів тертя полімерних матеріалів

Для дослідження коефіцієнту тертя у зоні завантаження черв'ячного устаткування необхідно звернути увагу на експлуатаційні умови що впливають на коефіцієнт тертя. Основним чином він залежить від параметрів навантаження та температури. Тому при проведенні літературного огляду методів дослідження коефіцієнтів тертя полімерних матеріалів було з акцентовано увагу саме на ці параметри. Також для вирішення поставленої задачі необхідно враховувати, що матеріал в зоні завантаження черв'ячного устаткування перебуває у вигляді твердих гранул, таким чином, дослідження коефіцієнту тертя саме гранульованих полімерних матеріалів є актуальним завданням.

Коефіцієнт тертя визначається, як правило, натурними дослідями. При літературному огляді було виявлено, що немає єдиної методики для експериментального визначення коефіцієнтів тертя.

У методі [1] пропонується визначати коефіцієнт тертя на лабораторній установці (рис. Схема установки чавунного вкладишу). Установка дозволяє контролювати момент тертя, сумарний лінійний знос зразка та конртзразка та температуру в зоні тертя. Коефіцієнт тертя при схемі «вал-стрічка» визначається по формулі, яка отримана із рівняння Ейлера:

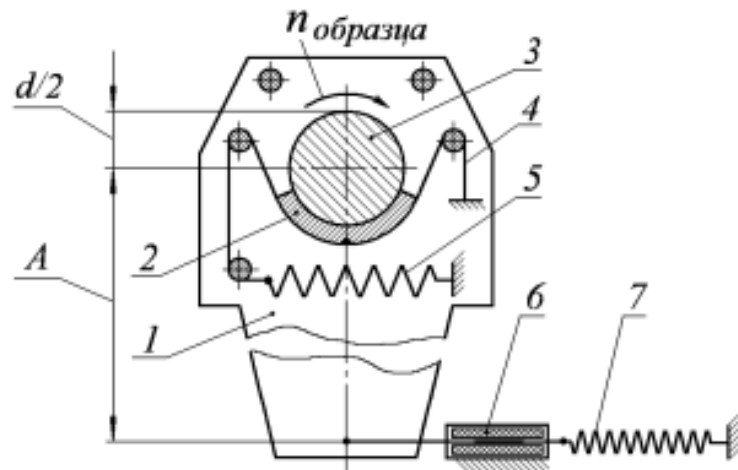
$$f = \frac{\ln\left(\frac{6.66 \cdot W_{np}}{Q} + 1\right)}{\alpha}, \quad (1.1)$$

де, 6,66 – величина передаточного коефіцієнта; N – зусилля навантаження зразка;

$Q = \frac{N}{\sin(\alpha/2)}$ – сила навантаження стрічки; α – кут захоплення зразка стрічкою,

W_{np} – сила дії поворотних пружин каретки трибометра.

Полімерний вкладиш встановлюється між зразком 3 та металевою стрічкою 4, якою контролюють зусилля притискання.



- 1 – каретка трибометра; 2 – вкладиш; 3 – зразок; 4 – сталева стрічка;
 5 – пружини натягу стрічки; 6 – датчик кута повороту каретки;
 7 – поворотні пружини каретки трибометра

Рисунок 1.4– Схема установки чавунного вкладишу

Недоліком використання даного методу для вирішення нашої задачі полягає в тому, що лабораторна установка не дозволяє використовувати гранульований полімерний матеріал.

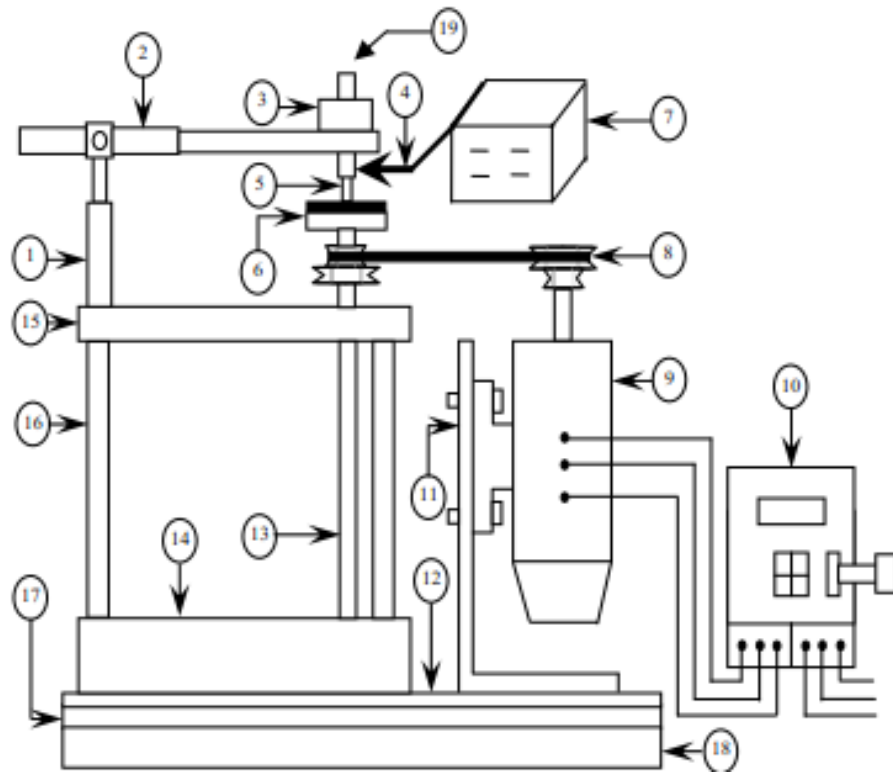
У методі [9] пропонується визначати коефіцієнт тертя полімеру за допомогою експериментальної установки (рис. 1.5). Де полімерний диск 6 обертається разом зі столом, за допомогою pasa та шківів 8 від двигуна 9, і притискається контактним зразком 5 із заданим зусиллям, яке створюється важелем 2. Силу тертя вимірюють цифровим індикатором тензодатчика 7.

Коефіцієнт тертя визначається, як відношення сили тертя ковзання до нормальної складової сили, що притискає тіла один до одного.

Установка (рис. 1.5) дає можливість вимірювати коефіцієнт тертя залежно від часу, протягом якого відбувається тертя, а також залежно від нормальної складової сили, що притискає тіла один до одного.

Недоліком даного методу для знаходження коефіцієнту тертя є те, що дана установка не дає можливості знаходження залежності коефіцієнту тертя від

температури, а також не придатна для дослідження гранульованого полімерного матеріалу.



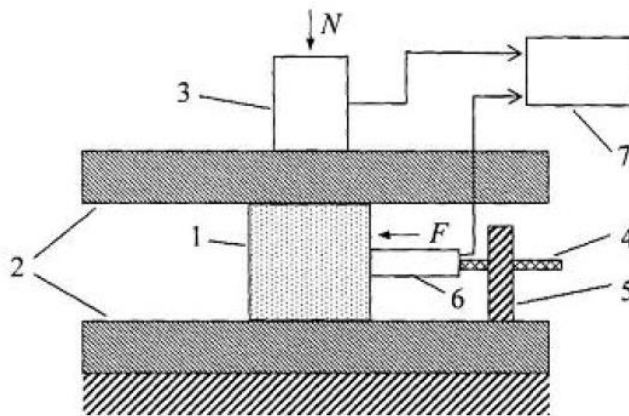
1 – тримач важеля; 2 – важіль; 3 – нормальне навантаження; 4 – горизонтальне навантаження (сила тертя); 5 – контактний зразок; 6 – тестовий зразок; 7 – індикатор тензодатчика; 8 – пас та шків; 9 – двигун; 10 – блок керування швидкістю; 11 – станина двигуна; 12 – гумова підкладка; 13 – головний вал; 14 – сталева опірня плита; 15 – сталева пластина; 16 – квадратний стрижень; 17 – основна опірня плита; 18 – гумовий блок; 19 – тримач

Рисунок 1.5– Блок схема експериментальної установки

У методі [31] (рис. 1.6) визначають коефіцієнт тертя встановлюючи зразок 1, з одного матеріалу виготовлений у вигляді паралелепіпеда, між зразками 2, виготовлених з іншого матеріалу, через пружний елемент 3 який оснащений тензометричним мостом. Зразки 2 здійснюють одновісне стискування силою N до значення N_0 , за допомоги гвинта 4 що жорстко закріплена в опорі 5 відносно

зразка 2. Через пружний елемент 6 із тензометричним мостом довжиною діють на зразок 1 навантаженням F , яке перпендикулярне силі N і пропорційне деформації δ елемента 6. Реєструючий пристрій 7 приймає сигнали від тензометричних мостів елементів 3 і 6. При цьому результат реєстрації величин $F(t)$, $N(t)$ та $\delta(t)$, що змінюються в часі, відображається на моніторі комп'ютера у реальному часі у вигляді графіків. Зсувне навантаження $F(t)$ змінюють, обертанням гвинта 4, до значення $F_c(t_c)$, при якому зразок 1 зсувається відносно зразків 2. Після чого коефіцієнт тертя встановлюють по залежності:

$$k_d(c_i) = \frac{F_i(t_i)}{2N_i(t_i)} \quad (1.2)$$



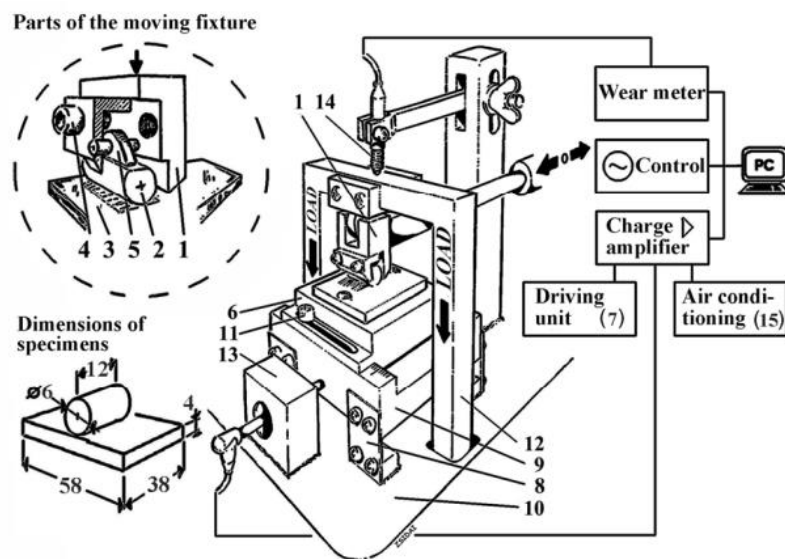
1 – зразок; 2 – зразки 3 – пружний елемент з тензорним мостом;
4 – гвинт; 5 – опора; 6 – пружний елемент; 7 – реєструючий пристрій

Рисунок 1.6 – Схема визначення динамічного коефіцієнта тертя

Недоліком методу є неможливість визначення коефіцієнту тертя від температури, а також не має можливості використовувати зразки у вигляді грануляту.

У методі [8], експериментальна установка якого зображена на рис. 1.7. тертя вимірюють наступним чином: тертя створюється полімерним циліндром 2, який переміщається по нижній сталевій пластині 3. Зразок полімеру закріплений на рухомому кріпленні 1 двома гайками та затискачем 4, запобігаючи його

прокручуванню під час випробування, і таким чином гарантується просте ковзання. Коливальний рух циліндра забезпечується двигуном 7 з регульованою змінною швидкістю через ексцентрикову передачу для регулювання ходу. Слайдер із гладкими направляючими 9 з'єднаний з опорною плитою 10 за допомогою чотирьох пружин 8. Пружини мають дуже високу жорсткість у вертикальному напрямку, але гнучкі у горизонтальному напрямку. Горизонтальному руху перешкоджає п'єзо-електричний перетворювач 13. Машина обладнана системою ручного навантаження, що складається з навантажувальної рами 12, та навантажувального гвинта (на рис. не зображено). Нормальна сила передається безпосередньо на рухомий зразок. Для вимірювання сили тертя використовується п'єзоелектричний перетворювач сили 13. Нормальне зміщення циліндричного зразка до сталеві пластини внаслідок зносу вимірюється безконтактним проксиметром 14.



- 1 – рухоме кріплення; 2 – циліндр із полімеру; 3 – нерухома сталева плита; 4 – затискач; 5 – розподільник навантаження; 6 – плитотримач; 7 – двигун; 8 – листові пружини; 9 – слайдер із гладким направляючим; 10 – опорна плита; 11 – черв'як; 12 – навантажувальна рама; 13 – п'єзо-електричний перетворювач; 14 – безконтактний проксиметр; 15 – система кондиціонування повітря

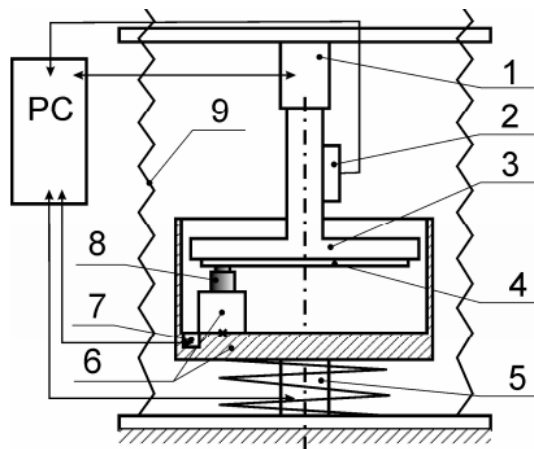
Рисунок 1.7– Експериментальна установка

Даний метод не може забезпечити вирішення поставленої задачі, а саме виміряти коефіцієнт тертя для гранульованого матеріалу, також даний метод не враховує як впливають на коефіцієнт тертя різні значення температур.

У методі [2] пропонується вимірювати коефіцієнт тертя за допомогою установки TRM 500 (рис.Рисунок 1.8).

У тримач зразка 6 встановлюється полімерний зразок 8, до якого за допомогою приводу навантаження 9 притискається контр-зразок 4 зі сталі, який встановлений на тримачі контр-зразка 3. Тертя між зразками створюється крутним моментом, що забезпечується приводом ротора 1. Під час роботи установки за допомогою датчика температури 7, датчика навантаження 5 та датчика крутного моменту 2 знімаються параметри, необхідні для визначення коефіцієнту тертя, та обробляються на комп'ютері.

Недоліком даного методу є те, що він не дає змоги регулювати температуру під час проведення дослідів, а також не має змоги використовувати гранульований матеріал, що не може вирішити поставлену задачу.



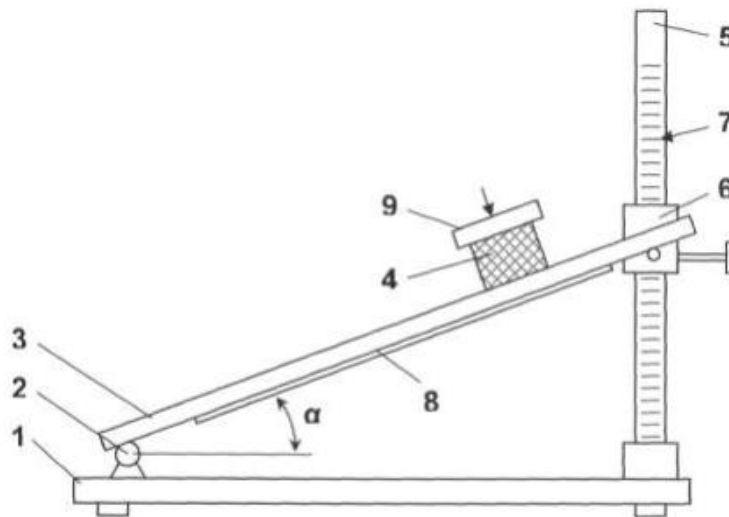
- 1 – привід ротора; 2 – датчик крутного моменту; 3 – тримач контр-зразка;
 4 – контр-зразок (диск); 5 – датчик навантаження; 6 – тримач зразка;
 7 – датчик температури; 8 – зразок; 9 – привід навантаження

Рисунок 1.8 – Установка для визначення коефіцієнта тертя

Установка [30] працює в такий спосіб.

Для дослідження коефіцієнту тертя кускового матеріалу (рис. 1.9) залежно від умов проведення досліджень (тиск, температура, кут нахилу пластини 3) за допомоги засобу 8 для термостабілізації пластини 3 і знімного засобу 9, які забезпечують необхідну температуру пластини 3 і зусилля, яке діє на зразок 4 матеріалу, що досліджується, а також встановлюють повзун 6 на стояку 5 таким чином, щоб пластина 3 стала в горизонтальне положення, шкала 7 кута повороту на відмітку "0". Рукояткою повзуна 6 пластина 3 встановлюється в похиле положення. У момент, коли зразок 4 починає рухатися по пластині 3, за шкалою 7 фіксується кут на який нахилилася пластина 3.

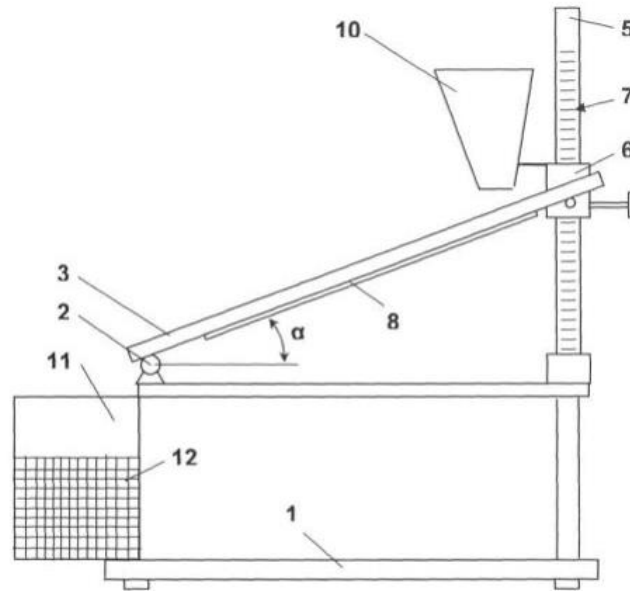
Для проведення досліджень із сипким матеріалом (рис. 1.10) останній насипається у бункер 10, що встановлений над пластиною 3 із зазором, після чого пластина 3 приводиться в похиле положення. У момент початку руху матеріалу збільшення кута нахилу пластини 3 припиняється, і по координатній сітці фіксуються координати руху матеріалу 12 приймального бункеру 11.



1 – опорна рама; 2 – шарнір; 3 – пластина; 4 – зразок; 5 – стояк;
6 – повзун; 7 – шкала; 8 – засіб термостабілізації; 9 – засіб для
навантаження;

Рисунок 1.9 – Установка для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя кускового матеріалу

Перевагою цього методу є те, що він дає змогу вимірювати коефіцієнти тертя для кускового та сипкого матеріалів, але даний метод не дає змоги змінювати навантаження на досліджуваний матеріал у широкому діапазоні, що обмежує дослідження.



- 1 – опорна рама; 2 – шарнір; 3 – пластина; 5 – стояк;
 6 – повзун; 7 – шкала; 8 – засіб термостабілізації; 10 – витратний бункер;
 11 – приймальний бункер; 12 – координатна сітка

Рисунок 1.10 – Установка для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипучого матеріалу

Залежності коефіцієнта тертя від нормального навантаження має вигляд, показаний на рисунку 1.11 і пояснюється це тим, що при терті пластмас контакт є частково пружним і частково пластичним з переважанням першого при малих навантаженнях і останнього при збільшенні навантажень.

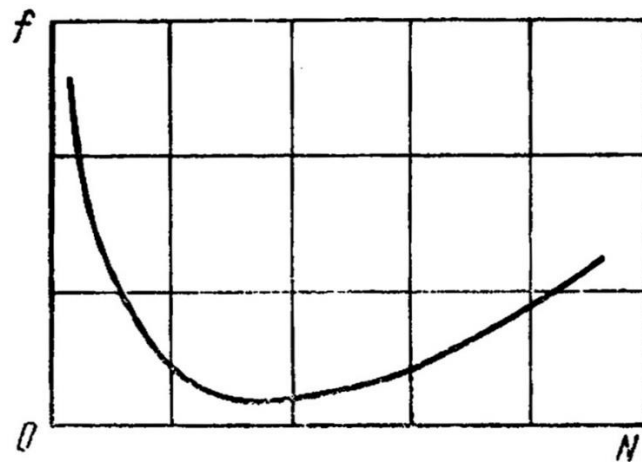


Рисунок 1.11 – Типова залежність коефіцієнта тертя від нормального навантаження полімера по сталі

Тертя також має залежати від температури, оскільки в'язкопружність є найбільш характерної властивістю пластмас. Це підтверджується експериментально майже для всіх полімерних матеріалів. Залежність коефіцієнтів тертя від температури, загальному випадку має вигляд, показаний рисунку 1.12.

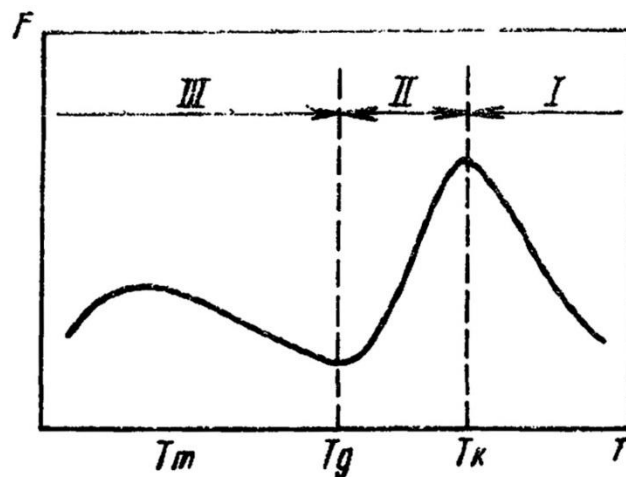


Рисунок 1.12 – Типова залежність коефіцієнта тертя від температури полімера по сталі

Крива розділяється на три зони, що відповідають вискоеластичному стану полімеру (I), перехідній області (II) та склоподібному стану (III) [14]. При високих температурах в зоні I тертя з пониженням температури зростає,

набуваючи максимальних значень при температурі кристалізації T_k . В зоні II сила тертя при переході із високоеластичного до склоподібного стану зменшується і в зоні III проходить вдруге через максимум при температурі текучості T_t . Таким чином, на кривій залежності сили тертя від температури присутні два максимуми: головний в області склування та низькотемпературний в склоподібному стані.

1.6 Огляд математичної руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера

Класична теорія екструзії базується на розв'язанні математичних моделей аналітичними методами для так званої оберненої плоскопаралельної моделі з нерухомим черв'яком і обертовим циліндром [39,42,35,38], яка дає можливість привести задачу до прямокутної системи координат, вважаючи черв'як нерухомим і розгорнутим на площині, а циліндр – таким, що рухається відносно каналу черв'яка й теж розгорнутим на площині.

Оскільки класичні розв'язки одержані для плоскопаралельної моделі з нерухомим черв'яком і обертовим циліндром, то процеси, що в дійсності мають місце біля поверхні обертового черв'яка, умовно переносяться до стінки нерухомого циліндра. Це не має істотного значення при розрахунку гідродинаміки й визначенні продуктивності, а також під час обчислення інтенсивності дисипації та інтегрального значення температури, але такий підхід може призвести до суттєвих похибок, якщо необхідно враховувати теплообмін із зовнішніми системами термостабілізації.

У роботах [26, 25] пропонують вважати, що як і в реальному процесі обертається черв'як, а циліндр залишається нерухомим. Крім того, у відмінності від плоскопаралельної моделі задачу будемо вирішувати в циліндричній системі координат r, θ, z (рис.1.13, *a*). Також виділимо об'єм, що відповідає об'єму одного кроку витка гвинтової нарізки та який має довжину ΔL та умовно

здеформуємо його, повернувши на величину кута підйому нарізки черв'яка $\varphi_{\text{ч}}$, після чого виділений об'єм приймає форму кільцевого циліндра (рис. 1.13, б).

Вказана циліндрична система координат r, θ, z нерухома відносно виділеного об'єму та рухається вздовж осі L разом з ним. Рух виділеного об'єму розглядається в прямокутній декартовій системі координат x, y, z .

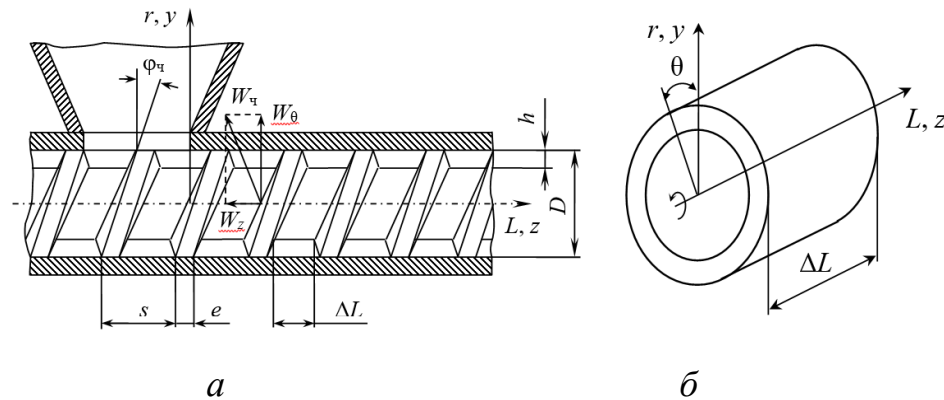


Рисунок 1.13 – До математичної моделі зони подачі одночерв'ячного екструдера: *а* – модель процесу екструзії в циліндричній системі координат; *б* – кільцевий об'єм, рівний одному кроку гвинтової нарізки черв'яка

На рис. 1.13 D, h та e – діаметр, висота та ширина гребня нарізки черв'яка, м; s – крок гвинтової нарізки черв'яка, м; ΔL – ширина каналу в осьовому напрямку черв'яка, м; $\varphi_{\text{ч}}$ – кут підйому нарізки черв'яка, °; $W_{\text{ч}}$ – лінійна швидкість поверхні гребня гвинтової нарізки черв'яка, м/с; W_z та W_{θ} – складові швидкості $W_{\text{ч}}$ вздовж координатних осей, м/с.

Тоді процес теплообміну можна розглядати, як нестационарний та рівняння нестационарної теплопровідності в рухомій системі матиме вигляд:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (1.3)$$

де ρ, c, λ – густина, кг/м³, масова теплоємність, Дж/(кг·К), теплопровідність, Вт/(м·К), як функції температури $T, ^\circ\text{C}$; t – час, с; q_v – об'ємна густина теплового потоку внутрішніх джерел енергії, Вт/м³.

Час переміщення виділеного об'єму вздовж координати L визначається залежністю:

$$t = L/w_L, \quad (1.4)$$

де w_L – швидкість виділеного об'єму вздовж координати L .

Якщо вважати масову продуктивність зони подачі G_M відомою, то швидкість w_L можна визначити із залежності:

$$G_M = \rho_{\text{нас}} S_{\text{ч}} w_L, \quad (1.5)$$

де $\rho_{\text{нас}}$ – насипна густина, кг/м³; $S_{\text{ч}}$ – площа діаметрального перерізу каналу черв'яка, м², яка дорівнює:

$$S_{\text{ч}} = \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2h)^2] - \frac{eh}{\text{tg } \varphi_{\text{ч}}}, \quad (1.6)$$

Підставляючи залежність (1.6) у вираз (1.5), можна визначити швидкість руху виділеного об'єму вздовж осі екструдера [25]:

$$w_L = \frac{G_M}{\rho S_{\text{ч}}} = \frac{G_M}{\rho \left\{ \frac{\pi}{4} [D^2 - (D - 2h)^2] - \frac{eh}{\text{tg } \varphi_{\text{ч}}} \right\}}, \quad (1.7)$$

Оскільки розміри гребня витка несуттєві у порівнянні з розгорнутою довжиною кільцевого елемента, то його впливом на теплообмін знехтуємо та будемо вважати процес осесиметричним ($\partial T / \partial \theta = 0$). У порівнянні з довжиною елемента ΔL малою також є глибина нарізки, а тому знехтуємо і теплопровідністю у напрямку осі z . Також, оскільки відносний рух гранул, а також внутрішні дисипативні джерела теплоти у виділеному об'ємі відсутні, то $q_V = 0,3$ урахуванням вище викладеного, а також рівняння (1.4) з урахуванням рівняння (1.3) приймає вигляд:

$$\rho c w_L \frac{\partial T}{\partial L} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial L} (r \lambda \frac{\partial T}{\partial r}). \quad (1.8)$$

Питомі теплові потоки $q_{\text{ч}}$ та $q_{\text{ц}}$ (Вт/м²), що виділяються у наслідку тертя на поверхнях черв'яка та циліндра, частково відводяться рідинами, які охолоджують вказані робочі органи екструдера. Співвідношення між цими потоками, крім інших факторів, залежить з одного боку від теплопровідності термопластичного матеріалу, а з іншої – від коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{\text{ч}}$ та $\alpha_{\text{ц}}$ (Вт/(м²·К)) до рідин (зазвичай на вході), які охолоджують черв'як та циліндр.

Теплові потоки $q_{\text{ч}}$ та $q_{\text{ц}}$, які залежать від сил тертя між термопластичним матеріалом та поверхнями черв'яка та циліндра, можна визначити по залежностям

$$q_{\text{ч}} = pK_p f_{\text{ч}} w_{\text{ч}},$$

$$q_{\text{ц}} = pK_p f_{\text{ц}} w_{\text{ц}},$$

де p – тиск в осьовому напрямку, Па; K_p – коефіцієнт бокового тиску, який дорівнює співвідношенню тиску на поверхні черв'яка та циліндра, до осьового тиску; $f_{\text{ч}}$ та $f_{\text{ц}}$ – коефіцієнти тертя термопластичного матеріалу по черв'яку та циліндру $f_{\text{ч}} = f(v, h, p, t)$ та $f_{\text{ц}} = f(v, h, p, t)$; v – швидкість, м/с; h – висота шару гранул, м; p – тиск, Па; t – температура, °С; $w_{\text{ц}}$ та $w_{\text{ч}}$ – швидкості проковзування термопластичного матеріалу відносно черв'яка та циліндра, м/с

Коефіцієнт бокового тиску K_p збільшує анізотропію тиску, яка заключається у тому, що осьовий тиск нерівномірно передається на поверхні черв'яка та циліндра внаслідок сил тертя в масі частинок термопластичного матеріалу. Чисельно коефіцієнт K_p рівний співвідношенню тиску на бокові поверхні робочого каналу до осьового тиску. Коефіцієнт бокового тиску є функцією від $K_p = f(v, h, p, t)$, а конкретний вид цієї функції встановлюється на основі обробки результатів експериментальних досліджень. Експериментально досліджено, що в статичних умовах коефіцієнт бокового тиску рівний 0,3...0,4, при динамічних умовах він може досягати одиниці.

Для подальшого аналізу використаємо метод, який запропоновано у роботі [33]. У результаті відповідних перетворень можна отримати залежність градієнта тиску по довжині черв'яка:

$$\frac{dp}{dL} = \frac{pf_{\text{ц}}\pi DK_p}{bh} \left[\cos(\omega + \varphi_{\text{ч}}) - f_{\text{ч}} \sin(\omega + \varphi_{\text{ч}}) - \frac{f_{\text{ч}}}{f_{\text{ц}}} \left(1 - \frac{2h}{D} \right) \right] \quad (1.9)$$

Як бачимо, параметри процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера, зокрема: тиск в робочому каналі екструдера, теплота, що виділяється в результаті тертя гранульованого полімеру по черв'яку та циліндру екструдера, а отже і температура перероблюваного полімеру залежать

від коефіцієнтів тертя полімеру по черв'яку та полімеру по циліндру, а також від коефіцієнту бокового тиску.

Проте, оскільки зазначені фізико-механічні властивості сипких гранульованих полімерів досліджені не повною мірою, то виникає потреба в проведенні додаткових експериментальних та теоретичних досліджень.

1.7 Висновки до розділу 1

Було проведено літературний огляд існуючих установок для визначення коефіцієнту тертя в залежності від різних факторів та проведено огляд математичної моделі процесу живлення екструдера. Було проаналізовано методи якими визначають коефіцієнт тертя, бачимо, що немає єдиної методики визначення коефіцієнту тертя і більшість методів придатні для дослідження лише кускових полімерних матеріалів, а для визначення коефіцієнту тертя для гранульованого матеріалу підходить лише метод [30], але який має свої недоліки. Тому є актуальним створення нової дослідної установки та методики для проведення досліджень залежності коефіцієнтів тертя та бокового тиску гранульованого полімерного матеріалу по металевій поверхні робочих органів екструдера.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИСКРЕТНОГО ОПИСУ РУХУ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ

2.1 Постановка задачі рухомого шару сипучого матеріалу

Найбільш близьким описом реальної поведінки сипучого матеріалу є дискретний опис руху сипучого середовища на базі методу дискретного елемента (МДЕ), який полягає в дослідженні взаємодії окремої частинки зі всіма частинками шару сипучого матеріалу в лагранжевій системі відліку [11-6].

В основі МДЕ лежить баланс механічного руху частинки сипучого матеріалу у лагранжевій системі відліку:

$$\begin{cases} m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \mathbf{b} + \sum_{j=1}^k \mathbf{F}_{ij}; \\ I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^k (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}), \end{cases} \quad (2.1)$$

де m_i – маса, кг; t – час, с; i – індекс частинки, відносно якої розглядається система рівнянь (1); \mathbf{v}_i – вектор лінійної швидкості центра маси частинки, м/с; I_i – момент інерції, кг·м²; $\boldsymbol{\omega}_i$ – вектор кутової швидкості, рад/с; \mathbf{b} – вектор масової сили, Н/кг; \mathbf{F}_{ij} – зовнішня сила, що діє на частинку i через контакт з частинкою j , Н; j – індекс частинок, що перебувають у контакті з частинкою i ; k – кількість частинок в контакті з частинкою i ; \mathbf{T}_{ij} – зовнішній крутний момент, пов'язаний з контактною взаємодією частинок i та j , Н·м; \mathbf{M}_{ij} – момент опору коченню, Н·м.

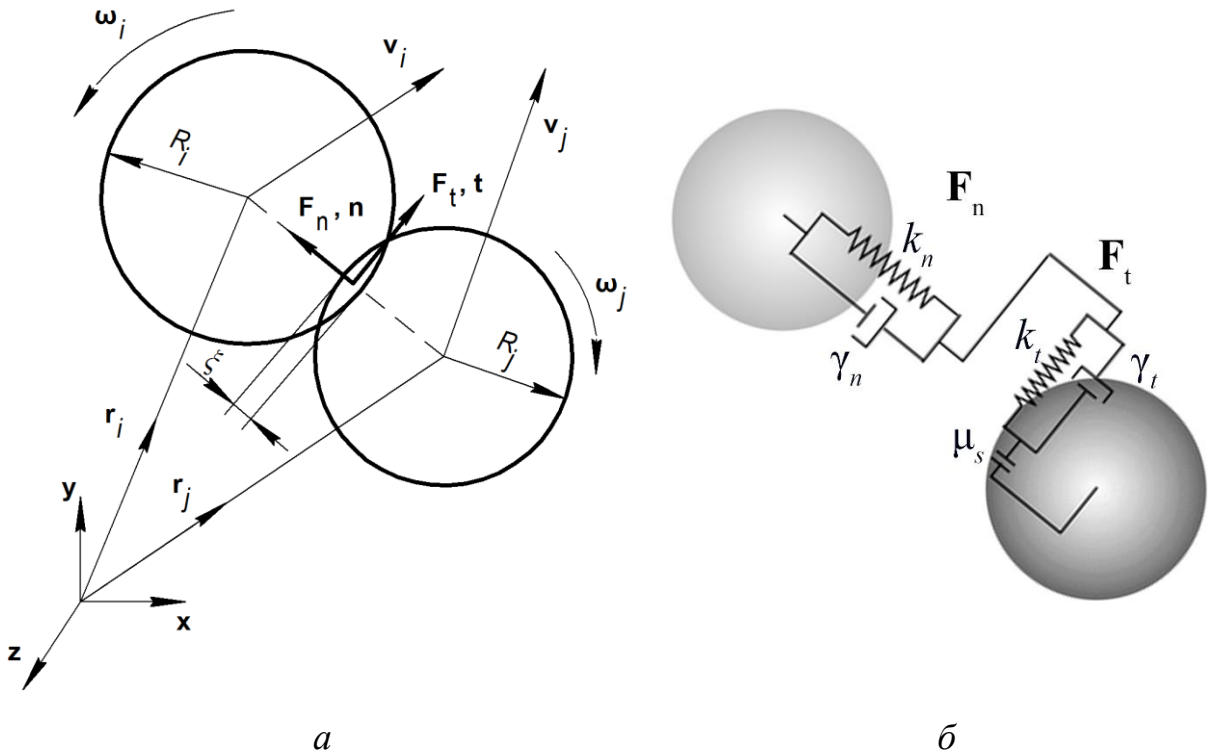
В МДЕ припускається, що кожна частинка є сферою радіусом R_i . Схематично взаємодія між частинками i та j представлена на рис. 2.1, а.

Для опису контактної взаємодії між частинками в МДЕ можуть прийматися різні формулювання. Найчастіше зустрічається в'язко-пружна

модель Hertz–Mindlin (див. рис. 2.2, б) [4], яка припускає, що частинки під час контакту не деформуються, а перекривають одна одну на величину ξ , утворюючи пляму контакту. Сумарна сила взаємодії між двома частинками розкладається на нормальну та тангенціальну складові $\mathbf{F}_{n,ij}$, $\mathbf{F}_{t,ij}$, відповідно, які визначаються таким чином [11, 4, 10]:

$$\mathbf{F}_{n,ij} = k_n \xi_n \mathbf{n} - \gamma_n \mathbf{v}_n, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{F}_{t,ij} = -\min \{k_t \xi_t \mathbf{t} - \gamma_t \mathbf{v}_t; \mu_s \mathbf{F}_n\}, \quad (2.3)$$



a – векторна схема контакту: \mathbf{v}_i , \mathbf{v}_j – вектор швидкості центра маси частинок;

$\boldsymbol{\omega}_i$, $\boldsymbol{\omega}_j$ – вектор кутової швидкості; \mathbf{r}_i , \mathbf{r}_j – радіус-вектор; $\mathbf{r}_i = \{x, y, z\}$;

$$x, y, z \in \Omega_1;$$

Ω_1 – розрахункова область частинок; \mathbf{n} – одиничний нормальний вектор уздовж лінії, яка з'єднує центри частинок *i* та *j*; ξ – нормальне перекриття частинок *i* та *j*; *b* – схема в'язко-пружної взаємодії між частинками

Рисунок 2.3 – Дві сферичні частинки i та j , що перебувають у контакті

де $k_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \xi_n}$ – коефіцієнт пружності за нормальної контактної взаємодії, Н/м; $E^* \rightarrow \left(\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j} \right)$ – ефективний модуль пружності, Па; E – модуль пружності у разі одновісного розтягнення/стискання, Па; ν – коефіцієнт Пуассона; $R^* \rightarrow \left(\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right)$ – приведений радіус частинок, м; $\xi_n = R_i + R_j - (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \cdot \mathbf{n}$ – відносне нормальне перекриття частинок під час контактної взаємодії, м; $\gamma_n = -2\sqrt{\frac{5}{3}} \beta \sqrt{E^* m^*} \sqrt[4]{R^* \xi_n} \geq 0$ – коефіцієнт демпфування в нормальному напрямі до поверхні контакту, кг/с; $\beta = \frac{\ln e_{ij}}{\sqrt{\ln^2 e_{ij} + \pi^2}}$ – безрозмірний коефіцієнт демпфування; e_{ij} – коефіцієнт реституції між матеріалами частинок i та j ; $m^* \rightarrow \left(\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)$ – приведена маса, кг; $\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j + (R_i \boldsymbol{\omega}_i + R_j \boldsymbol{\omega}_j) \times \mathbf{n}$ – відносна швидкість у точці контакту частинок, м/с; $\mathbf{v}_n = (\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}$ – нормальна складова \mathbf{v}_{ij} ; $\mathbf{v}_t = (\mathbf{n} \times \mathbf{v}_{ij}) \times \mathbf{n}$ – тангенціальна складова \mathbf{v}_{ij} ; μ_s – коефіцієнт тертя ковзання; $\xi_t = \int_{\tau_0}^{\tau} |(\mathbf{n} \times \mathbf{v}_{ij}) \times \mathbf{n}| d\tau$ – відносне тангенціальне перекриття частинок, що почалось в момент часу τ_0 і продовжується до даного моменту часу τ , м; $\mathbf{t} = \frac{\mathbf{v}_t}{|\mathbf{v}_t|}$ – одиничний тангенціальний вектор; $k_t = 8G^* \sqrt{R^* \xi_n}$ – коефіцієнт зсуву під час контактної взаємодії, Н/м; $G^* \rightarrow \left[\frac{1}{G^*} = \frac{2(2+\nu_i)(1-\nu_i)}{E_i} + \frac{2(2+\nu_j)(1-\nu_j)}{E_j} \right]$ – ефективний модуль зсуву, Па;

$\gamma_t = -4\sqrt{\frac{5}{3}}\beta\sqrt{G^*m^*}\sqrt[4]{R^*\xi_n} \geq 0$ – коефіцієнт демпфування у тангенціальному напрямі до поверхні контакту, кг/с.

Крутний момент, що діє на частинку, створюється тангенціальною силою $\mathbf{F}_{t,ij}$ та визначається таким рівнянням

$$\mathbf{T}_{ij} = (R_t \mathbf{n}) \times \mathbf{F}_{t,ij}. \quad (2.4)$$

За відносного руху частинок також виникає момент опору коченню \mathbf{M}_{ij}

$$\mathbf{M}_{ij} = -\mu_r k_n \xi_n R^* \frac{\boldsymbol{\omega}_i}{|\boldsymbol{\omega}_i|}, \quad (2.5)$$

де μ_r – коефіцієнт тертя кочення.

За початкові умови беруть початкові координати та початкову швидкість усіх частинок системи:

$$\mathbf{r}_i|_{t=0} = \mathbf{r}_{i_0}, i = \overline{1, n}; \quad (2.6)$$

$$\mathbf{v}_i|_{t=0} = \mathbf{v}_{i_0}, i = \overline{1, n}, \quad (2.7)$$

де n – загальна кількість частинок у системі; \mathbf{r}_{i_0} – початковий радіус вектор для кожної частинки, м; \mathbf{v}_{i_0} – початковий вектор швидкості для кожної частинки, м/с.

Граничні умови для МДЕ при $t > 0$, описують взаємодію частинок з границями розрахункової області Ω_1 , рухомими та нерухомими стінками $G \in \Omega_1$ всередині області:

- частинка перебуває в контакті зі стінкою $g \in G$ геометрії розрахункової області, даний контакт розглядається аналогічно іншим контактам частинки, а сили взаємодії розраховуються з врахуванням того, що лінійна та кутова швидкості стінки є заданими:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_g &= \text{const}; \\ \boldsymbol{\omega}_g &= \text{const}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

- частинка i перебуває за межами розрахункової області. Вважається, що вона покидає систему та більше не бере участі в розрахунках

$$\mathbf{r}_i \notin \Omega_1 \rightarrow n-1. \quad (2.9)$$

Згідно з теорією МДЕ кожна частинка є фізичною точкою з постійними фізичними характеристиками, тобто із самої постановки впливає баланс маси системи. У результаті розв'язання дискретної задачі отримуємо траєкторії руху кожної окремої частинки в системі відліку Лагранжа.

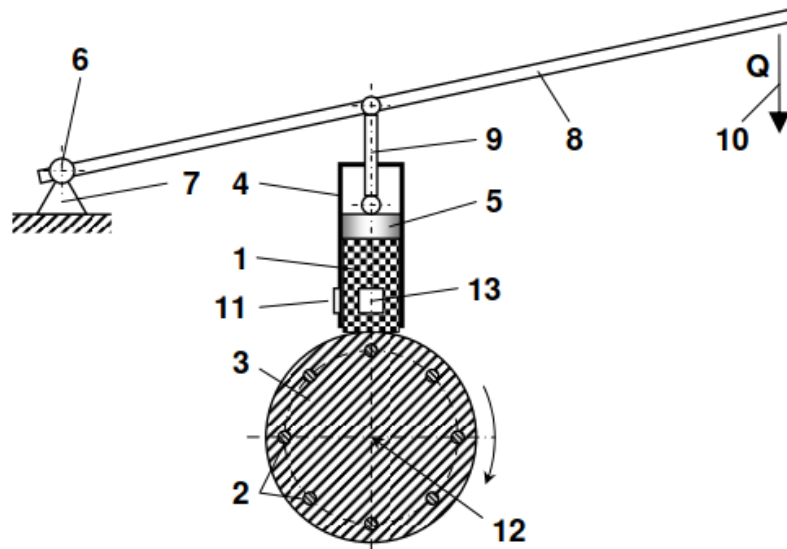
2.2 Висновки до розділу 2

Розглянувши існуючі математичні моделі було вирішено, уточнити параметри математичної моделі процесів у зоні живлення черв'ячного екструдера із урахуванням специфіки фрикційного режиму руху гранульованих полімерних матеріалів тому, що немає достатньої інформації про фізико-механічні властивості матеріалів, а особливо гранульованих матеріалів. Зокрема у відкритому доступі мало інформації про коефіцієнти тертя та коефіцієнти бокового тиску полімерних гранульованих матеріалів, якщо така інформація і є то вона лише для вузького, спеціалізованого під певні процеси, кола матеріалів. Тому актуально досліджувати вказані властивості матеріалів, щоб доповнити і розширити відомості про них.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕРТЯ ГРАНУЛЬОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Експериментальна установка

Для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя матеріалів по різних поверхнях, у тому числі й залежно від температури навантаження й висоти шару гранул, а також визначення бокового тиску було розроблено експериментальну установку (рис. 3.1), конструкція установки захищена патентами [18-19]:



1 – сипучий матеріал; 2 – нагрівники; 3 – ротор; 4 – корпус; 5 – штовхач;
6 – шарнір; 7 – стійка; 8 – важіль; 9 – шток; 10 – протизвага; 11 – динамометр;
12 – вісь ротора; 13 – динамометр

Рисунок 3.1 – Схема дослідної установки

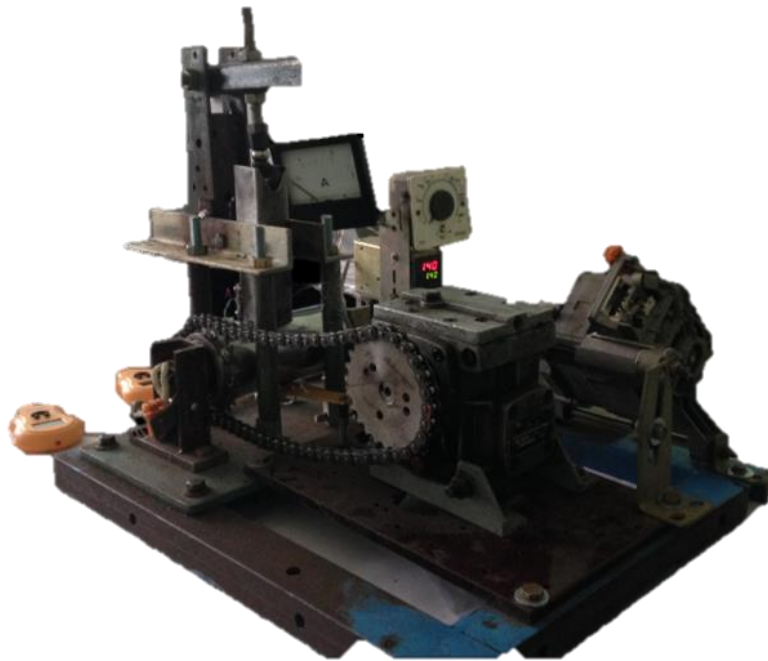


Рисунок 3.2 – Фото дослідної установки

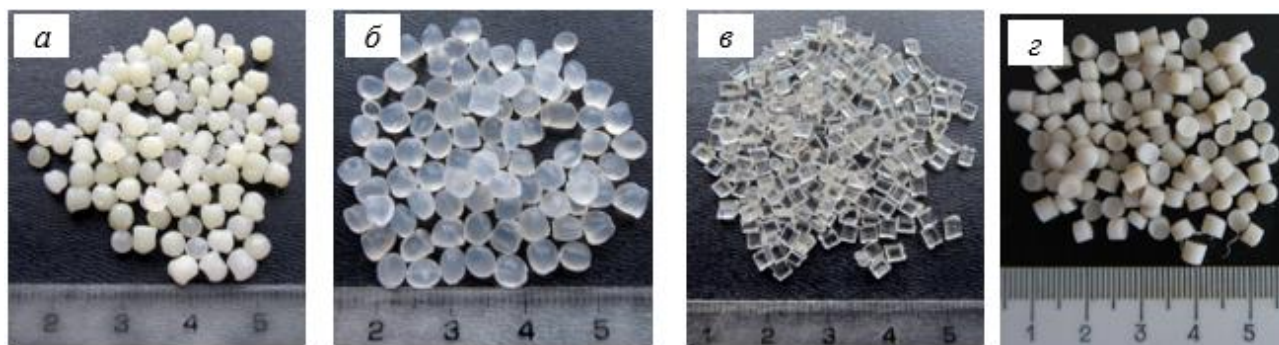
Дана експериментальна установка містить споряджений нагрівниками 2 горизонтальний ротор 3, встановлений над ним вертикальний порожнистий корпус 4 для сипучого матеріалу 1 зі встановлюваним у ньому штовхачем 5, що взаємодіє з регулятором вертикальної сили 6, виконаним у вигляді шарнірно закріпленого на стояку 7 важеля 8 з одним плечем для взаємодії зі штоком 9 і з другим для закріплення на ньому протизаги 10. Також установку споряджено засобом вимірювання горизонтальної сили 11, що діє на порожнистий корпус перпендикулярно осі 12 ротора 3, а порожнистий корпус – засобом вимірювання горизонтальної сили 13, що діє на порожнистий корпус вздовж осі 12 ротора 3.

Установка працює таким чином.

Залежно від потрібних умов проведення досліджень (температура, тиск) за допомогою нагрівників 2, а також протизаги 10 та її плеча на важелі 8 забезпечують відповідно потрібні значення температури ротора 3 і зусилля на штовхачі 5, що діє на зразок сипучого матеріалу 1. Після початку обертання ротора 3 з певною швидкістю засобами 11 і 13 вимірювання горизонтальних сил

у взаємноперпендикулярних напрямках, що дає змогу визначити як коефіцієнт зовнішнього тертя сипучого матеріалу 1 по матеріалу ротора 3, так і коефіцієнт бокового тиску.

На рисунку 3.3 наведені фотознімки полімерних гранул, що використовувались при проведенні експериментів. Дослідження проводились для чотирьох типів полімерних гранул. Ці полімерні гранули були обрані тому, що вони широко використовуються у промисловості і одночасно відрізняються між собою своїми властивостями: розмірами, формою і фізико-механічними характеристиками (що призводить до різних моделей поведінки).



a – поліетилен високої густини марки 15803-020 (ГОСТ 16337–77);

б – сополімер етилену з вінілацетатом (севілен) марки 11104-030 (ТУ 6-05-1636–97); *в* – полістирол марки ПС-С-1-3 (ГОСТ 20282–86); *з* – полівінілхлорид SorVyl G 2171/9005 11/01

Рисунок 3.3 – Фотознімки використовуваних полімерних гранул

3.2 Методика проведення експериментів

Хіміко-технологічні процеси представляють собою комплекс взаємопов'язаних і протікають в складній взаємозалежності явищ, опис яких

ускладнюється необхідністю встановлення закономірностей протікання елементарних процесів, їх взаємодії і взаємовпливу один на одного. Ці процеси відносять до класу стохастичних, в якому зміна визначальних величин відбувається хаотично і часто дискретно. Для опису стохастичних процесів використовують статистико-ймовірнісні методи.

Одним з методів, що добре зарекомендували себе у вирішенні такого роду завдань, є метод повного факторного експерименту, в основі якого лежить спосіб побудови залежності впливу визначальних факторів на параметр оптимізації у вигляді відрізка степеневого ряду Тейлора.

Метод повного факторного експерименту включає у себе послідовні етапи математичного моделювання:

- 1) Вибір параметрів оптимізації і впливаючих факторів;
- 2) Вибір інтервалу варіювання по кожному фактору;
- 3) Побудова математичної моделі зі знаходженням коефіцієнтів рівняння регресії;

У нашому випадку на параметри оптимізації Y_1 та Y_2 , в якості яких обрані коефіцієнт тертя та бокового тиску, будуть впливати наступні фактори:

- 1) Швидкість обертання ротора (X_1);
- 2) Температура ротора (X_2);
- 3) Тиск на матеріал (X_3);
- 4) Висота шару гранул (X_4).

Для факторів 1-4 були обрані основні рівні та інтервали варіювання (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Значення рівней факторів та інтервалів варіювання

Показник	X_1 , м/с		X_2 , °C		X_3 , МПа		X_4 , м	
	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Код
Нижній рівень	min	-1	min	-1	min	-1	min	-1
Верхній рівень	max	1	max	1	max	1	max	1

Після чого будується матриця повного факторного експерименту (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Матриця планування повного факторного експерименту

№ досліду	X1	X2	X3	X4	Y1	Y2
1	+1	+1	+1	-1		
2	+1	+1	-1	+1		
3	+1	-1	+1	-1		
4	+1	-1	-1	+1		
5	-1	+1	+1	-1		
6	-1	+1	-1	+1		
7	-1	-1	+1	-1		
8	-1	-1	-1	+1		

Обробка результатів відбувається за наступним алгоритмом [13]:

1. Для кожної серії паралельних дослідів вираховують середнє арифметичне значення функції відгуку по формулі:

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Y_{j,i} \quad (3.1)$$

де, j – номер серії паралельних дослідів;

k – число паралельних дослідів, проведених при однакових умовах;

$Y_{j,i}$ – поточне значення параметра оптимізації i-того досліду j-тої серії.

2. Розрахунок коефіцієнтів регресії ведеться по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_j ; \quad (3.2)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji} Y_j ; \quad (3.3)$$

$$b_{lm} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{jl} X_{jm} Y_j , \quad (3.4)$$

де, $l \neq m$.

3.3 Результати експерименту

3.3.1 Результати експерименту для полістиролу

Для полістиролу основні рівні та інтервали варіювання записані у таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Основний рівень та інтервал варіювання для полістиролу

Показник	X1, м/с		X2, °C		X3, Мпа		X4, м	
	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Код
Нижній рівень	0,176	-1	20	-1	0,044	-1	0,015	-1
Верхній рівень	0,471	1	80	1	0,475	1	0,025	1

При проведенні досліджень впливу швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул на коефіцієнт тертя гранульованого полістиролу по металу та коефіцієнт бокового тиску були отримані такі експериментальні дані (таблиця 3.4). У таблиці 3.4 вказані середні показники динамометра однієї серії досліджень при однакових умовах (5 вимірів).

Таблиця 3.4 – Результати експериментальних досліджень

№ досліду	Показники динамометра для визначення $K_{тр}$, N, Н	Показники динамометра для визначення $K_{б.т.}$, N, Н	Коефіцієнт тертя, $K_{тр}$	Коефіцієнт бокового тиску, $K_{б.т.}$
1	22,167	1,452	0,485	0,348
2	1,533	0,103	0,470	0,347
3	21,375	1,300	0,468	0,312
4	1,600	0,082	0,491	0,274
5	15,700	1,400	0,344	0,336
6	1,575	0,107	0,483	0,358
7	18,600	1,438	0,407	0,345
8	1,150	0,070	0,353	0,235

Розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії для побудови рівняння регресії коефіцієнту тертя за формулами (3.2) – (3.4):

$$\begin{aligned}
 b_0 &= (0,485 + 0,470 + 0,468 + 0,491 + 0,344 + 0,438 + 0,407 + 0,353) / 8 = 0,438; \\
 b_1 &= (0,485 + 0,470 + 0,468 + 0,491 - 0,344 - 0,438 - 0,407 - 0,353) / 8 = 0,041; \\
 b_2 &= (0,485 + 0,470 - 0,468 - 0,491 + 0,344 + 0,438 - 0,407 - 0,353) / 8 = 0,008; \\
 b_3 &= (0,485 - 0,470 + 0,468 - 0,491 + 0,344 - 0,438 + 0,407 - 0,353) / 8 = -0,011; \\
 b_4 &= (-0,485 + 0,470 - 0,468 + 0,491 - 0,344 + 0,438 - 0,407 + 0,353) / 8 = 0,011; \\
 b_{12} &= (0,485 + 0,470 - 0,468 - 0,491 - 0,344 - 0,438 + 0,407 + 0,353) / 8 = -0,009; \\
 b_{13} &= (0,485 - 0,470 + 0,468 - 0,491 - 0,344 + 0,438 - 0,407 + 0,353) / 8 = 0,010; \\
 b_{14} &= (-0,485 + 0,470 - 0,468 + 0,491 + 0,344 - 0,438 + 0,407 - 0,353) / 8 = -0,010; \\
 b_{23} &= (0,485 - 0,470 - 0,468 + 0,491 + 0,344 - 0,438 - 0,407 + 0,353) / 8 = -0,020; \\
 b_{24} &= (-0,485 + 0,470 + 0,468 - 0,491 - 0,344 + 0,438 + 0,407 - 0,353) / 8 = 0,020; \\
 b_{34} &= (-0,485 - 0,470 - 0,468 - 0,491 - 0,344 - 0,438 - 0,407 - 0,353) / 8 = -0,438; \\
 b_{123} &= (0,485 - 0,470 - 0,468 + 0,491 - 0,344 + 0,438 + 0,407 - 0,353) / 8 = 0,029; \\
 b_{124} &= (-0,485 + 0,470 + 0,468 - 0,491 + 0,344 - 0,438 - 0,407 + 0,353) / 8 = -0,029; \\
 b_{134} &= (-0,485 - 0,470 - 0,468 - 0,491 + 0,344 + 0,438 + 0,407 + 0,353) / 8 = -0,041; \\
 b_{234} &= (-0,485 - 0,470 + 0,468 + 0,491 - 0,344 - 0,438 + 0,407 + 0,353) / 8 = -0,008; \\
 b_{1234} &= (-0,485 - 0,470 + 0,468 + 0,491 + 0,344 + 0,438 - 0,407 - 0,353) / 8 = 0,009.
 \end{aligned}$$

Будуємо залежність коефіцієнту тертя для полістиролу від швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул:

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= 0,438 + 0,041X_1 + 0,008X_2 - 0,011X_3 + 0,011X_4 - 0,009X_1X_2 + 0,010X_1X_3 - 0,010X_1X_4 - 0,020X_2X_3 + \\
 &+ 0,020X_2X_4 - 0,438X_3X_4 + 0,029X_1X_2X_3 - 0,029X_1X_2X_4 - 0,041X_1X_3X_4 - 0,008X_2X_3X_4 + 0,009X_1X_2X_3X_4
 \end{aligned}$$

Розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії для побудови рівняння регресії коефіцієнту бокового тиску:

$$\begin{aligned}
b_0 &= (0,358 + 0,347 + 0,312 + 0,274 + 0,336 + 0,458 + 0,345 + 0,235) / 8 = 0,320; \\
b_1 &= (0,358 + 0,347 + 0,312 + 0,274 - 0,336 - 0,458 - 0,345 - 0,235) / 8 = 0,002; \\
b_2 &= (0,358 + 0,347 - 0,312 - 0,274 + 0,336 + 0,458 - 0,345 - 0,235) / 8 = 0,029; \\
b_3 &= (0,358 - 0,347 + 0,312 - 0,274 + 0,336 - 0,458 + 0,345 - 0,235) / 8 = 0,017; \\
b_4 &= (-0,358 + 0,347 - 0,312 + 0,274 - 0,336 + 0,458 - 0,345 + 0,235) / 8 = -0,017; \\
b_{12} &= (0,358 + 0,347 - 0,312 - 0,274 - 0,336 - 0,458 + 0,345 + 0,235) / 8 = 0,001; \\
b_{13} &= (0,358 - 0,347 + 0,312 - 0,274 - 0,336 + 0,458 - 0,345 + 0,235) / 8 = -0,005; \\
b_{14} &= (-0,358 + 0,347 - 0,312 + 0,274 + 0,336 - 0,458 + 0,345 - 0,235) / 8 = 0,005; \\
b_{23} &= (0,358 - 0,347 - 0,312 + 0,274 + 0,336 - 0,458 - 0,345 + 0,235) / 8 = -0,020; \\
b_{24} &= (-0,358 + 0,347 + 0,312 - 0,274 - 0,336 + 0,458 + 0,345 - 0,235) / 8 = 0,020; \\
b_{34} &= (-0,358 - 0,347 - 0,312 - 0,274 - 0,336 - 0,458 - 0,345 - 0,235) / 8 = -0,320; \\
b_{123} &= (0,358 - 0,347 - 0,312 + 0,274 - 0,336 + 0,458 + 0,345 - 0,235) / 8 = 0,013; \\
b_{124} &= (0,358 + 0,347 + 0,312 + 0,274 + 0,336 + 0,458 + 0,345 + 0,235) / 8 = -0,013; \\
b_{134} &= (-0,358 - 0,347 - 0,312 - 0,274 + 0,336 + 0,458 + 0,345 + 0,235) / 8 = -0,002; \\
b_{234} &= (-0,358 - 0,347 + 0,312 + 0,274 - 0,336 - 0,458 + 0,345 + 0,235) / 8 = -0,029; \\
b_{1234} &= (-0,358 - 0,347 + 0,312 + 0,274 + 0,336 + 0,458 - 0,345 - 0,235) / 8 = -0,001;
\end{aligned}$$

Будуємо залежність коефіцієнту бокового тиску для полістиролу від швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул:

$$\begin{aligned}
Y_1 &= 0,320 + 0,002X_1 + 0,029X_2 + 0,017X_3 - 0,017X_4 + 0,001X_1X_2 - 0,005X_1X_3 + 0,005X_1X_4 - 0,020X_2X_3 + \\
&+ 0,020X_2X_4 - 0,320X_3X_4 + 0,013X_1X_2X_3 - 0,013X_1X_2X_4 - 0,002X_1X_3X_4 - 0,029X_2X_3X_4 - 0,001X_1X_2X_3X_4
\end{aligned}$$

3.3.2 Результати експерименту для поліетилену високої густини

Для поліетилену високої густини (далі ПВГ) основні рівні та інтервали варіювання записані у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Основний рівень та інтервал варіювання для ПВГ

Показник	X1, м/с		X2, °C		X3, Мпа		X4, м	
	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Код
Нижній рівень	0,176	-1	20	-1	0,044	-1	0,015	-1
Верхній рівень	0,471	1	80	1	0,475	1	0,025	1

При проведенні досліджень впливу швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул на коефіцієнт тертя гранульованого ПВГ по металу та коефіцієнт бокового тиску були отримані такі експериментальні дані (таблиця 3.6). У таблиці 3.6 вказані середні показники динамометра однієї серії досліджень при однакових умовах (5 вимірів).

Таблиця 3.6 – Результати експериментальних досліджень

№ досліджу	Показники динамометра для визначення $K_{тр}$, Н, Н	Показники динамометра для визначення $K_{б.т.}$, Н, Н	Коефіцієнт тертя, $K_{тр}$	Коефіцієнт бокового тиску, $K_{б.т.}$
1	22,000	1,417	0,482	0,340
2	1,667	0,088	0,511	0,294
3	21,800	1,453	0,477	0,348
4	1,593	0,083	0,489	0,280
5	20,400	1,433	0,447	0,344
6	1,5413	0,103	0,433	0,347
7	21,067	1,450	0,461	0,348
8	1,513	0,087	0,464	0,291

Розрахунки коефіцієнтів регресій розраховуються по аналогії, як і для полістиролу. Розрахунки наведені у додатку В1.

Будуємо залежність коефіцієнту тертя для полістиролу від швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул:

$$Y_1 = 0,471 + 0,019X_1 - 0,002X_2 - 0,004X_3 + 0,004X_4 + 0,009X_1X_2 - 0,006X_1X_3 + 0,006X_1X_4 - 0,001X_2X_3 + 0,001X_2X_4 - 0,471X_3X_4 - 0,004X_1X_2X_3 + 0,004X_1X_2X_4 - 0,019X_1X_3X_4 + 0,002X_2X_3X_4 - 0,009X_1X_2X_3X_4$$

Будуємо залежність коефіцієнту бокового тиску для полістиролу від швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул:

$$Y_1 = 0,326 - 0,006X_1 + 0,009X_2 + 0,019X_3 - 0,019X_4 - 0,004X_1X_2 + 0,006X_1X_3 - 0,006X_1X_4 - 0,012X_2X_3 + 0,012X_2X_4 - 0,326X_3X_4 + 0,003X_1X_2X_3 - 0,003X_1X_2X_4 + 0,006X_1X_3X_4 - 0,009X_2X_3X_4 + 0,004X_1X_2X_3X_4$$

3.3.3 Результати експерименту для полівінілхлориду

Для полівінілхлориду (далі ПВХ) основні рівні та інтервали варіювання записані у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Основний рівень та інтервал варіювання для ПВХ

Показник	X1, м/с		X2, °C		X3, Мпа		X4, м	
	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Код
Нижній рівень	0,176	-1	20	-1	0,044	-1	0,015	-1
Верхній рівень	0,471	1	60	1	0,475	1	0,025	1

При проведенні досліджень впливу швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул на коефіцієнт тертя гранульованого ПВХ по металу та коефіцієнт бокового тиску були отримані такі експериментальні дані (таблиця 3.8).

У таблиці 3.8 вказані середні показники динамометра однієї серії досліджень при однакових умовах (5 вимірів).

Таблиця 3.8 – Результати експериментальних досліджень

№ досліджу	Показники динамометра для визначення $K_{тр}$, N, Н	Показники динамометра для визначення $K_{б.т.}$, N, Н	Коефіцієнт тертя, $K_{тр}$	Коефіцієнт бокового тиску, $K_{б.т.}$
1	20,006	1,020	0,568	0,311
2	1,902	0,083	0,583	0,268
3	14,010	0,900	0,398	0,280
4	1,320	0,059	0,405	0,201
5	17,012	0,920	0,483	0,286
6	1,601	0,105	0,491	0,352
7	15,333	0,873	0,435	0,262
8	1,505	0,073	0,460	0,246

Розрахунки коефіцієнтів регресій розраховуються по аналогії, як і для полістиролу. Розрахунки наведені у додатку В3.

Будуємо залежність коефіцієнту тертя для ПВХ від швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул:

$$Y_1 = 0,478 + 0,011X_1 + 0,053X_2 - 0,007X_3 + 0,007X_4 + 0,003X_1X_2 + 0,001X_1X_3 + 0,001X_1X_4 + 0,001X_2X_3 - 0,001X_2X_4 - 0,478X_3X_4 - 0,003X_1X_2X_3 + 0,003X_1X_2X_4 - 0,011X_1X_3X_4 - 0,053X_2X_3X_4 - 0,034X_1X_2X_3X_4$$

Будуємо залежність коефіцієнту бокового тиску для ПВХ від швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул:

$$Y_1 = 0,276 - 0,011X_1 + 0,003X_2 + 0,009X_3 - 0,009X_4 - 0,004X_1X_2 + 0,021X_1X_3 - 0,021X_1X_4 - 0,015X_2X_3 + 0,015X_2X_4 - 0,276X_3X_4 + 0,006X_1X_2X_3 - 0,006X_1X_2X_4 + 0,011X_1X_3X_4 - 0,029X_2X_3X_4 + 0,004X_1X_2X_3X_4$$

3.3.4 Результати експерименту для севілену

Для севілену основні рівні та інтервали варіювання записані у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Основний рівень та інтервал варіювання для севілену

Показник	X1, м/с		X2, °C		X3, Мпа		X4, м	
	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Код	Значення	Код
Нижній рівень	0,176	-1	20	-1	0,044	-1	0,015	-1
Верхній рівень	0,471	1	60	1	0,475	1	0,025	1

При проведенні досліджень впливу швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул на коефіцієнт тертя гранульованого севілену по металу та коефіцієнт бокового тиску були отримані такі експериментальні дані (таблиця 3.10). У таблиці 3.10 вказані середні показники динамометра однієї серії досліджень при однакових умовах (5 вимірів).

Таблиця 3.10 – Результати експериментальних досліджень

№ досліду	Показники динамометра для визначення $K_{тр}$, Н, Н	Показники динамометра для визначення $K_{б.т.}$, Н, Н	Коефіцієнт тертя, $K_{тр}$	Коефіцієнт бокового тиску, $K_{б.т.}$
1	21,010	0,995	0,596	0,309
2	1,997	0,078	0,612	0,262
3	14,710	0,079	0,417	0,246
4	1,386	0,065	0,425	0,218
5	17,862	1,000	0,507	0,311
6	1,681	0,075	0,515	0,252
7	16,095	0,940	0,457	0,292
8	1,580	0,080	0,483	0,268

Розрахунки коефіцієнтів регресій розраховуються по аналогії, як і для полістиролу. Розрахунки наведені у додатку В2.

Будуємо залежність коефіцієнту тертя для севілену від швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул:

$$Y_1 = 0,502 + 0,011X_1 + 0,056X_2 - 0,007X_3 + 0,007X_4 + 0,004X_1X_2 + 0,001X_1X_3 - 0,001X_1X_4 + 0,001X_2X_3 - 0,001X_2X_4 - 0,502X_3X_4 - 0,003X_1X_2X_3 + 0,003X_1X_2X_4 - 0,011X_1X_3X_4 - 0,056X_2X_3X_4 - 0,035X_1X_2X_3X_4$$

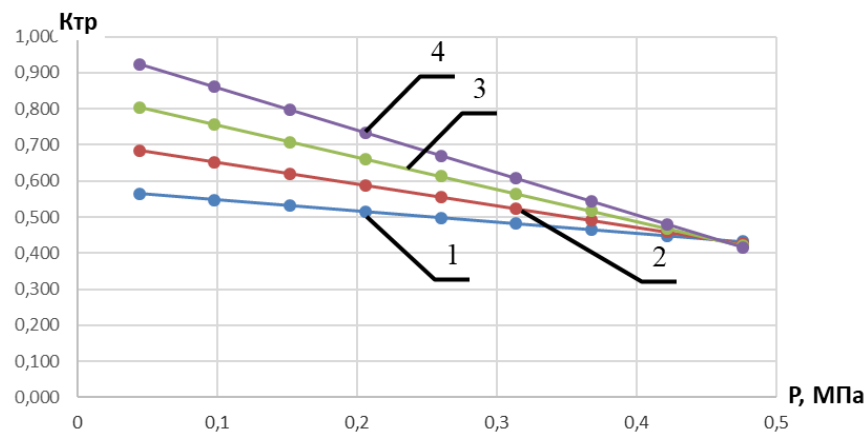
Будуємо залежність коефіцієнту бокового тиску для ПВХ від швидкості обертання ротора, температури, тиску та висоти шару гранул:

$$Y_1 = 0,270 - 0,011X_1 + 0,014X_2 + 0,020X_3 - 0,020X_4 + 0,013X_1X_2 - 0,001X_1X_3 + 0,001X_1X_4 + 0,001X_2X_3 - 0,007X_2X_4 - 0,270X_3X_4 - 0,002X_1X_2X_3 + 0,002X_1X_2X_4 + 0,011X_1X_3X_4 - 0,014X_2X_3X_4 - 0,013X_1X_2X_3X_4$$

3.4 Графічні залежності

3.4.1 Графічні залежності коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску для полістиролу

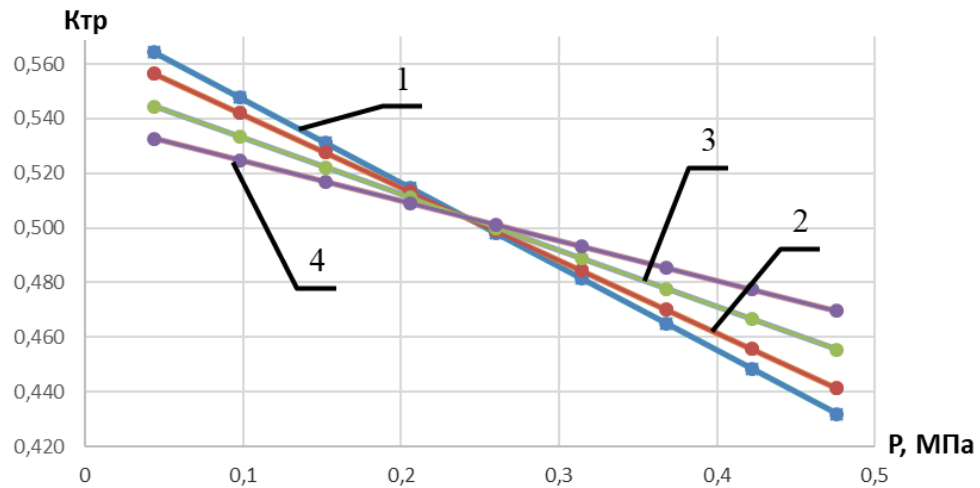
Використовуючи отримані рівняння регресії було побудовано графічні залежності коефіцієнтів тертя (рис. 3.4 – 3.7) та коефіцієнтів бокового тиску (рис. 3.8 – 3.9) для полістиролу. Параметри, що не вказані під графіками дорівнюють найнижчим значенням із діапазону повного факторного експерименту для відповідного матеріалу.



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C 4 – 80 °C

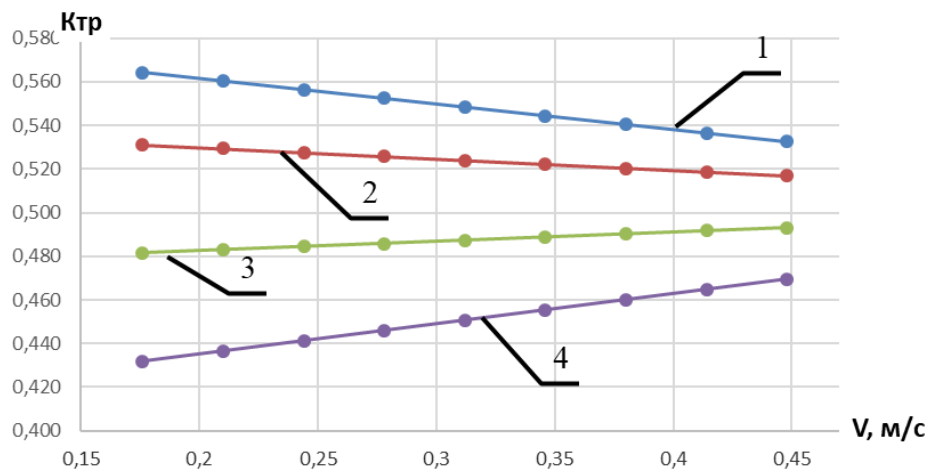
Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта тертя від тиску при різних температурах

На рисунку 3.4 видно загальне зменшення коефіцієнта тертя від тиску та бачимо, що зміна температури змінює характер залежності. Більш різке зниження коефіцієнту тертя при вищій температурі можна пояснити швидшим розм'якшенням полістиролу, що призводить до його руйнування на границях тертя з утворенням дрібної фракції.



1 – 0,176 м/с; 2 – 0,244 м/с; 3 – 0,346 м/с; 4 – 0,448 м/с

Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнта тертя від тиску при різних швидкостях

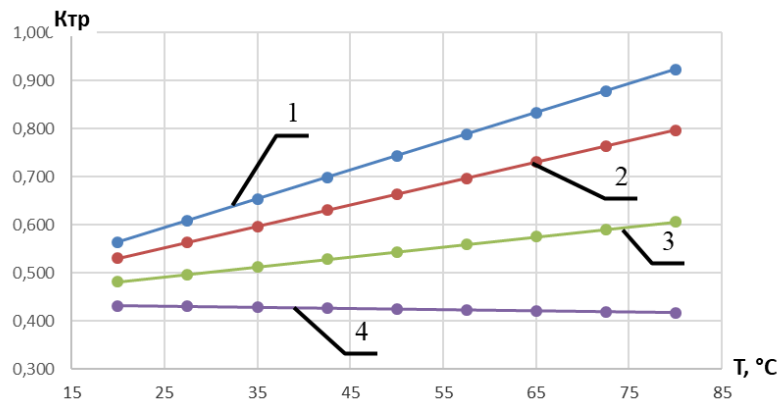


1 – 0,044 МПа; 2 – 0,152 МПа; 3 – 0,314 МПа; 4 – 0,476 МПа

Рисунок 3.6 – Залежність коефіцієнта тертя від швидкості при різних тисках

На рисунках 3.5 та 3.6 бачимо зниження коефіцієнту тертя від тиску, а також бачимо, що при невисокому тиску збільшення швидкості впливає на зменшення коефіцієнту тертя. У джерелі [16] для полістиролу це пояснюється зменшенням міцності при зсуві через розм'якшення поверхневого шару при збільшенні навантаження. Однак при збільшенні тиску і збільшенні швидкості одночасно сприяє збільшенню коефіцієнта тертя, що можна пояснити

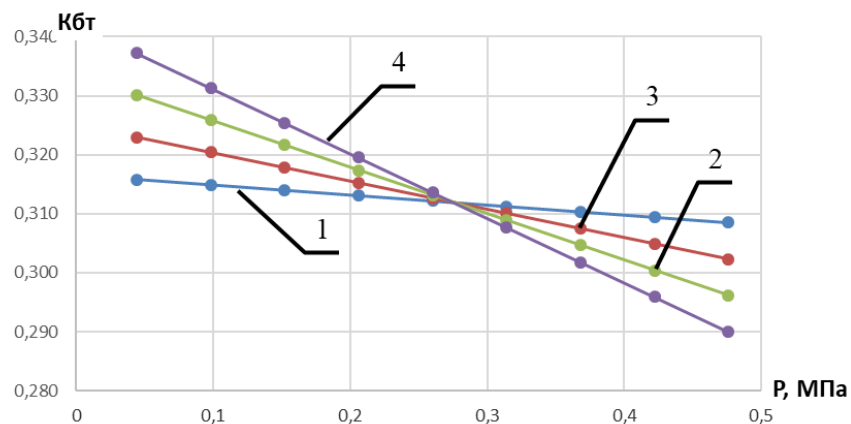
виділенням теплової енергії, що відповідно нагріває поверхні тертя, розм'якшує гранули полістиролу і збільшує тертя між ними.



1 – 0,044 МПа; 2 – 0,152 МПа; 3 – 0,314 МПа; 4 – 0,476 МПа

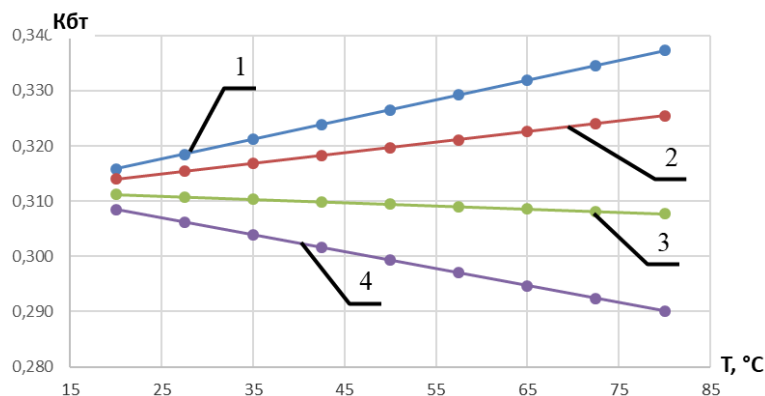
Рисунок 3.7 – Залежність коефіцієнта тертя від температури при різних тисках

На рисунку 3.7 бачимо зростання коефіцієнту тертя при збільшенні температури, окрім залежності 4, де коефіцієнт тертя починає знижуватися при зростанні температури. Це можна пояснити тим, що при високій температурі та тиску виділяється велика кількість теплової енергії від дисипації, тому поверхня тертя полістиролу переходить у стан близький до в'язкотекучого та починає текти.



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C 4 – 80 °C

Рисунок 3.8 – Залежність коефіцієнта бокового тиску від тиску при температурі



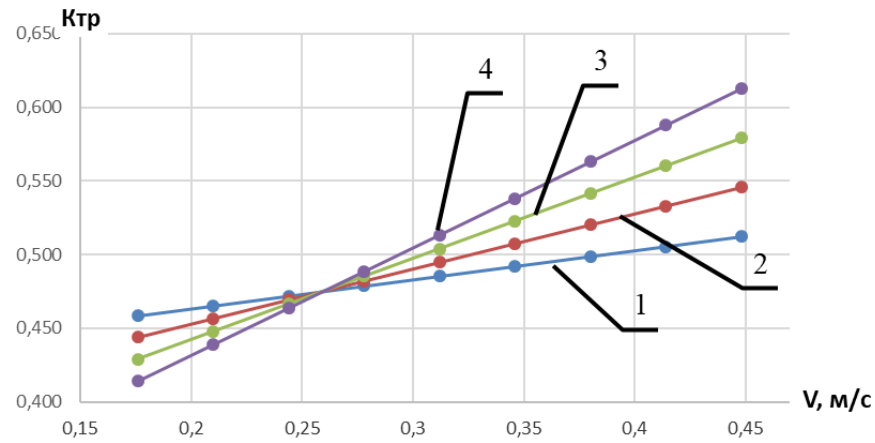
1 – 0,044 МПа; 2 – 0,152 МПа; 3 – 0,314 МПа; 4 – 0,476 МПа

Рисунок 3.9 – Залежність коефіцієнта бокового тиску від температури при різних тисках

На рисунках 3.8 та 3.9 зображено залежність коефіцієнта бокового тиску від температури при різних тисках. Бачимо, що при збільшенні тиску коефіцієнт бокового тиску для полістиролу знижується, це можна пояснити тим, що при збільшенні тиску, гранули ущільнюються і починають вести себе, як суцільне тіло, тим самими гірше передають тиск на бічну поверхню. Також бачимо, що при низькому тиску збільшення температури підвищує коефіцієнт бокового тиску, а при зростанні тиску навпаки – знижує, що пояснюється кращим ущільненням матеріалу при досягненні певного тиску та температури.

3.4.2 Графічні залежності коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску для поліетилену високої густини

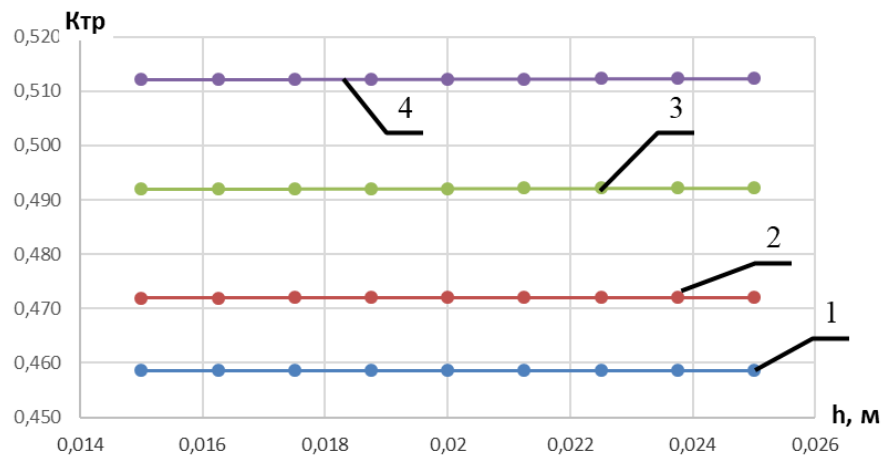
Використовуючи отримані рівняння регресії було побудовано графічні залежності коефіцієнтів тертя (рис. 3.10 – 3.11) та коефіцієнтів бокового тиску (рис. 3.12 – 3.13) для поліетилену високої густини. Параметри, що не вказані під графіками дорівнюють найнижчим значенням із діапазону повного факторного експерименту для відповідного матеріалу.



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C 4 – 80 °C

Рисунок 3.10 – Залежність коефіцієнта тертя від швидкості при різних температурах

На рисунку 3.10 зображені залежності коефіцієнта тертя від швидкості при різних температурах. Із залежностей бачимо, що при підвищенні швидкості коефіцієнт тертя для ПВГ зростає, також бачимо, що швидкість зростання коефіцієнту тертя залежить від температури, чим більша температура, тим швидше зростає коефіцієнт тертя.

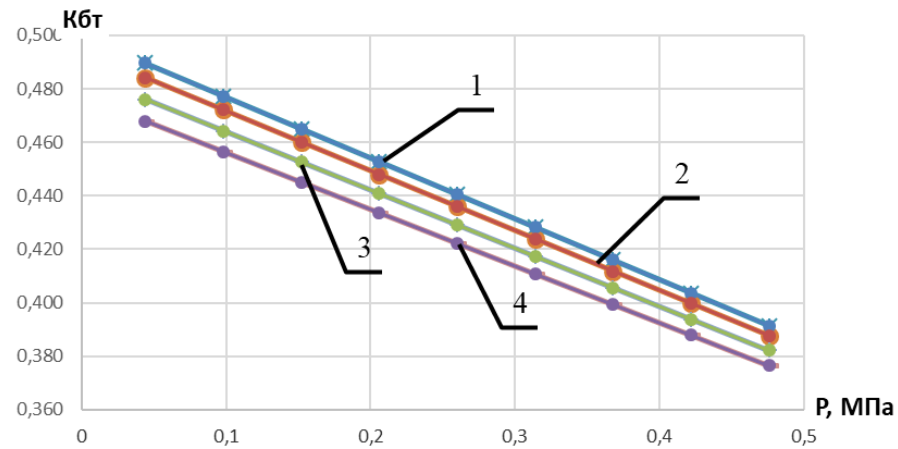


1 – 0,176 м/с; 2 – 0,244 м/с; 3 – 0,346 м/с; 4 – 0,448 м/с

Рисунок 3.11 – Залежність коефіцієнта тертя від висоти шару гранул при різних швидкостях

На рисунку 3.11 зображено залежність коефіцієнту тертя від висоти шару гранул при різних швидкостях. Із залежності бачимо, що коефіцієнт тертя для

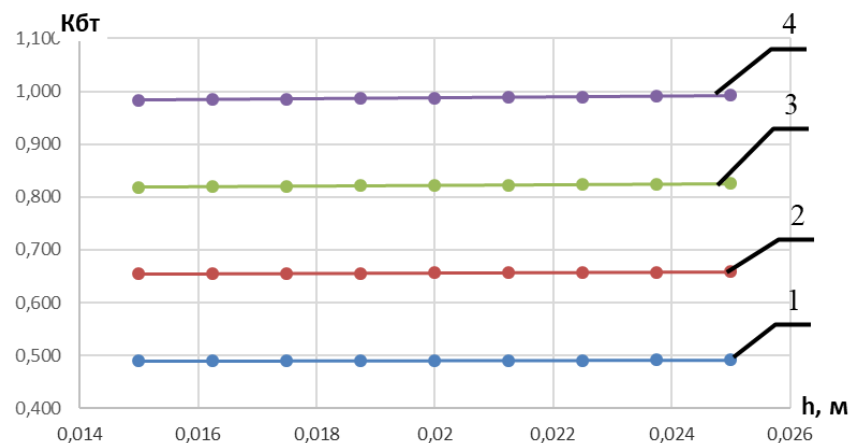
ПВГ не залежить від висоти шару гранул, також бачимо зростання коефіцієнта тертя від швидкості, що зумовлено підвищенням температури від енергії дисипації.



1 – 0,176 м/с; 2 – 0,244 м/с; 3 – 0,346 м/с; 4 – 0,448 м/с

Рисунок 3.12 – Залежність коефіцієнта бокового тиску від тиску при різних швидкостях

На рисунку 3.12 зображено залежність коефіцієнту бокового тиску від прикладеного до гранул тиску при різних швидкостях. Із залежності бачимо, що коефіцієнт бокового тиску зменшується при збільшенні як тиску, що пояснюється ущільненням матеріалу і гранули починають поводитися, як суцільне тіло.



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C 4 – 80 °C

Рисунок 3.13 – Залежність коефіцієнта бокового тиску від висоти шару гранул при різних температурах

На рисунку 3.13 зображено залежність коефіцієнту бокового тиску від шару гранул при різних температурах. Бачимо, що висота шару гранул не впливає на коефіцієнт бокового тиску, також бачимо, що збільшення температури збільшує коефіцієнт бокового тиску, що можна пояснити розм'якшення матеріалу, що в свою чергу веде до кращої передачі тиску.

3.4.3 Графічні залежності коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску для севілену

Використовуючи отримані рівняння регресії було побудовано графічні залежності коефіцієнтів тертя (рис.3.14 – 3.17) та коефіцієнтів бокового тиску (рис. 3.18 – 3.19) для севілену. Параметри, що не вказані під графіками дорівнюють найнижчим значенням із діапазону повного факторного експерименту для відповідного матеріалу.

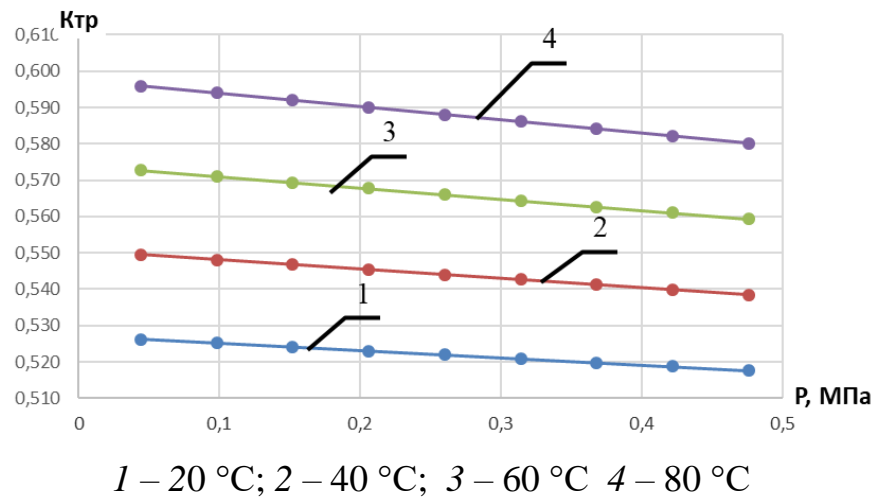
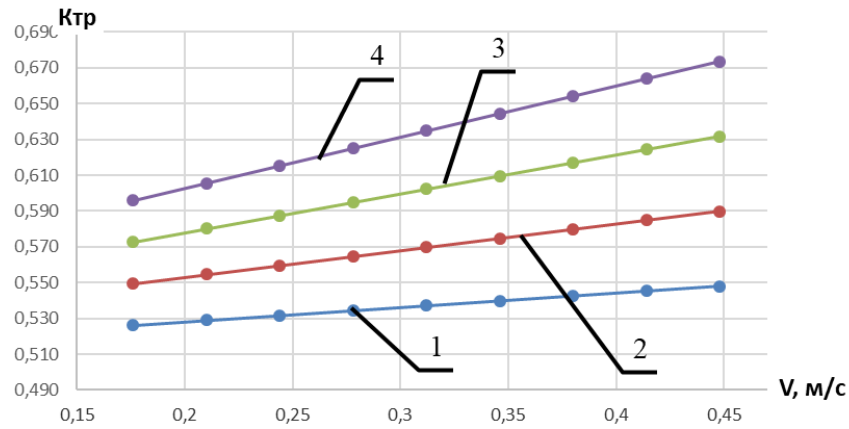


Рисунок 3.14 – Залежність коефіцієнта тертя від тиску при різних температурах

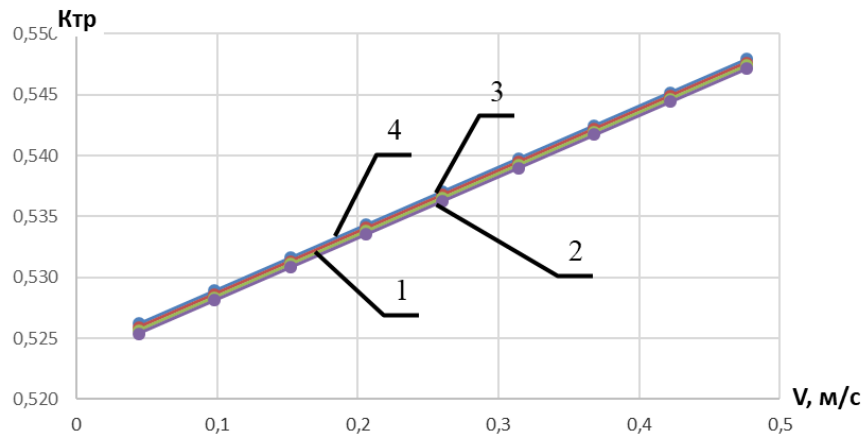
На рисунку 3.14 зображено залежність коефіцієнту тертя від тиску при різних температурах. Бачимо, що збільшення тиску сприяє зменшенню коефіцієнту тертя, а збільшення температури сприяє його зростанню.



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C 4 – 80 °C

Рисунок 3.15 – Залежність коефіцієнта тертя від швидкості при різних температурах

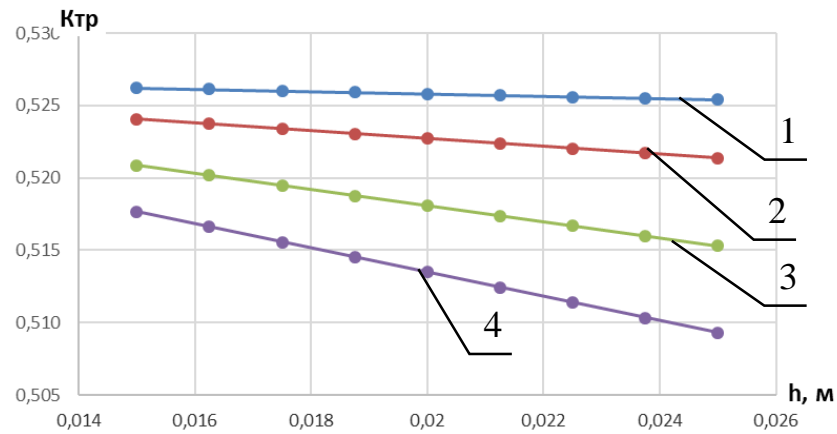
На рисунку 3.15 бачимо, що коефіцієнт тертя для севілену збільшується при збільшенні швидкості тертя, а також збільшується при підвищенні температури.



1 – 0,015 м; 2 – 0,019 м; 3 – 0,022 м; 4 – 0,025 м

Рисунок 3.16 – Залежність коефіцієнта тертя від швидкості при різних висоті шару гранул

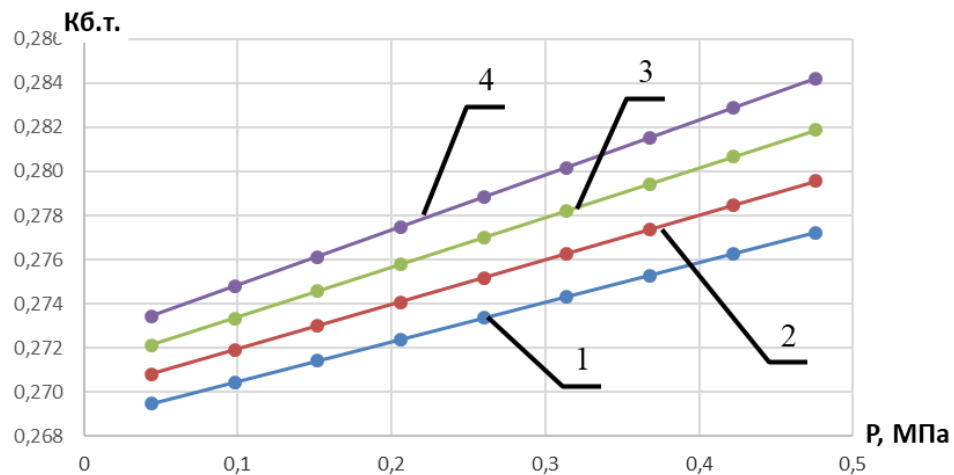
На рисунку 3.16 зображено залежність коефіцієнту тертя від швидкості тертя при різних висоті шару гранул. Бачимо, що коефіцієнт тертя збільшується при збільшенні швидкості, що можна пояснити виділенням тепла від енергії дисипації і розм'якшення гранул севілену, бачимо, що при даних параметрах коефіцієнт тертя не залежить від висоти шару гранул.



1 – 0,044 МПа; 2 – 0,152 МПа; 3 – 0,314 МПа; 4 – 0,476 МПа

Рисунок 3.17 – Залежність коефіцієнта тертя від висоти шару гранул при різних тисках

На рисунку 3.17 зображено залежність коефіцієнту тертя від висоти шару гранул при різному тиску. Бачимо, що при збільшенні тиску зменшується коефіцієнт тертя і збільшується вплив висоти шару гранул, що можна пояснити втратою частини тиску у верхніх шарах гранул через їх стисливість.

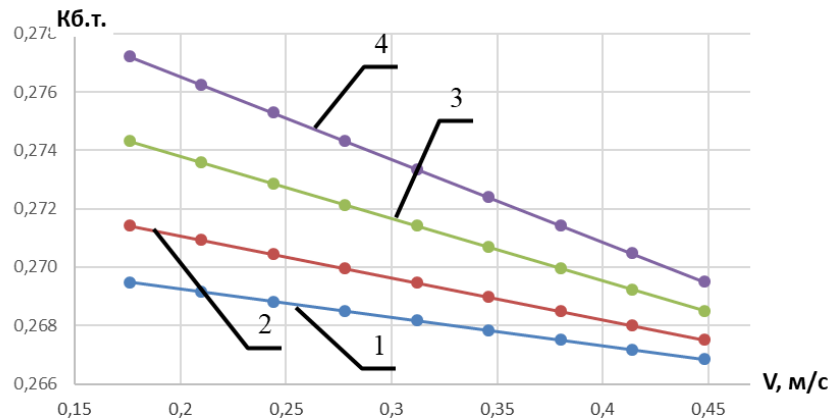


1 – 20 °С; 2 – 40 °С; 3 – 60 °С 4 – 80 °С

Рисунок 3.18 – Залежність коефіцієнта бокового тиску від тиску при різних температурах

На рисунку 3.18 зображено залежність коефіцієнту бокового тиску від прикладеного тиску при різних температурах. Із залежності бачимо, що для севілену при зростанні тиску зростає і коефіцієнт бокового тиску, що можна

пояснити м'яким станом гранул, а при збільшенні температури гранули розм'якшуються ще більше, через що тиск краще передається на бокові поверхні.



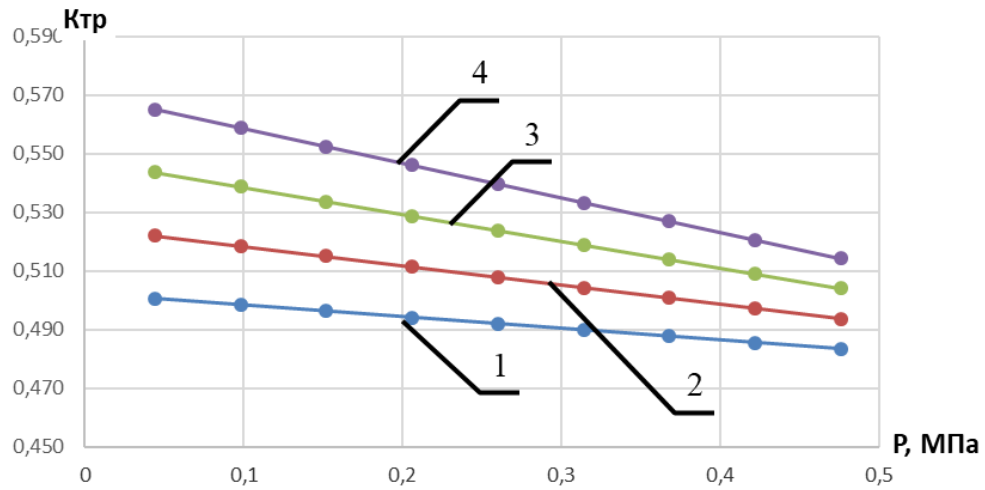
1 – 0,044 МПа; 2 – 0,152 МПа; 3 – 0,314 МПа; 4 – 0,476 МПа

Рисунок 3.19 – Залежність коефіцієнта бокового тиску від швидкості при різних тисках

На рисунку 3.19 зображено залежність коефіцієнту бокового тиску від швидкості тертя. Зниження коефіцієнту бокового тиску при збільшенні швидкості тертя можна пояснити тим, що при збільшенні швидкості збільшується зчеплення між поверхнями тертя, тим самим при збільшенні швидкості знімається частина навантаження з бокових стінок.

3.4.4 Графічні залежності коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску для ПВХ

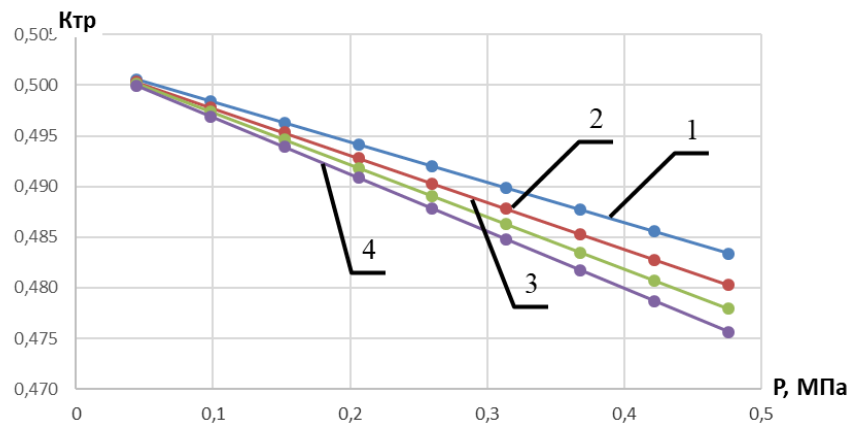
Використовуючи отримані рівняння регресії було побудовано графічні залежності коефіцієнтів тертя (рис. 3.20 – 3.23) та коефіцієнтів бокового тиску (рис. 3.24 – 3.25) для ПВХ. Параметри, що не вказані під графіками дорівнюють найнижчим значенням із діапазону повного факторного експерименту для відповідного матеріалу.



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C 4 – 80 °C

Рисунок 3.20 – Залежність коефіцієнта тертя від тиску при різних температурах

На рисунку 3.20 зображено залежність коефіцієнту тертя від тиску при різних температурах. Бачимо, що збільшення тиску сприяє зменшенню коефіцієнту тертя, а збільшення температури сприяє його зростанню.

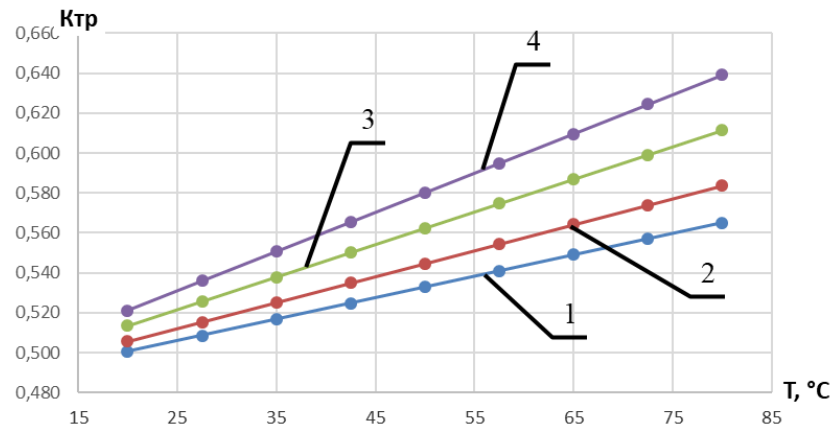


1 – 0,015 м; 2 – 0,019 м; 3 – 0,022 м; 4 – 0,025 м

Рисунок 3.21 – Залежність коефіцієнта тертя від тиску при різній висоті шару гранул

На рисунку 3.21 зображено залежність коефіцієнту тертя від тиску при різній висоті шару гранул. Бачимо, що при збільшенні тиску зменшується коефіцієнт тертя, також бачимо, що зі збільшенням висоти шару гранул

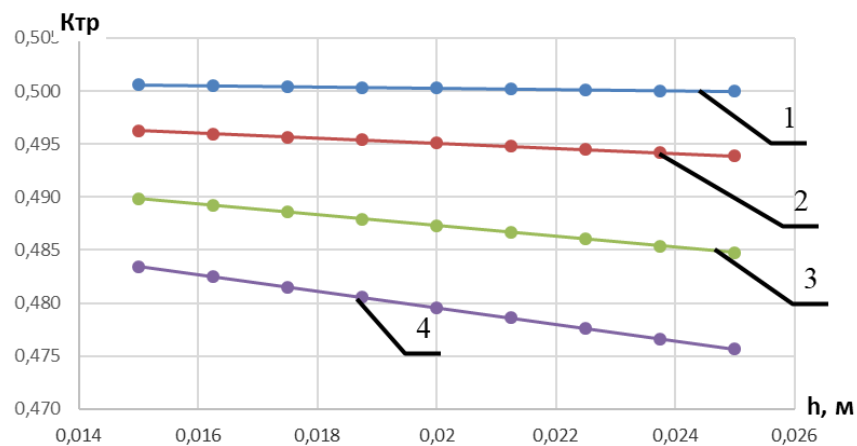
коефіцієнт тертя також знижується, що можна пояснити втратою частини тиску у верхніх шарах гранул.



1 – 0,176 м/с; 2 – 0,244 м/с; 3 – 0,346 м/с; 4 – 0,448 м/с

Рисунок 3.22 – Залежність коефіцієнта тертя від температури при різних швидкостях

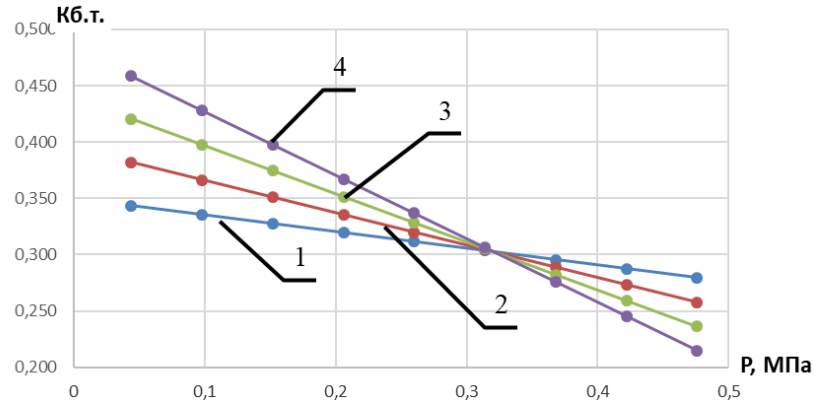
На рисунку 3.22 зображено залежність коефіцієнту тертя від температури при різних швидкостях. Бачимо, що при заданих параметрах коефіцієнт тертя збільшується і від температури, і від швидкості тертя, що можна пояснити розм'якшенням гранул.



1 – 0,044 МПа; 2 – 0,152 МПа; 3 – 0,314 МПа; 4 – 0,476 МПа

Рисунок 3.23 – Залежність коефіцієнта тертя від висоти шару гранул при різних тисках

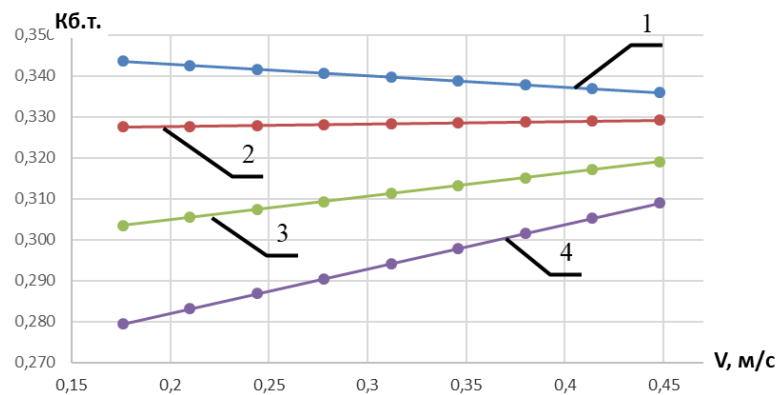
На рисунку 3.23 зображено залежність коефіцієнту тертя від висоти шару гранул при різному тиску. Бачимо, що при збільшенні тиску зменшується коефіцієнт тертя і збільшується вплив висоти шару гранул, що можна пояснити втратою частини тиску у верхніх шарах гранул через їх стисливість.



1 – 20 °C; 2 – 40 °C; 3 – 60 °C 4 – 80 °C

Рисунок 3.24 – Залежність коефіцієнта бокового тиску від тиску при різних температурах

На рисунку 3.24 зображено залежність коефіцієнту бокового тиску при різних температурах від прикладеного тиску. Із залежності бачимо, що коефіцієнт бокового тиску зменшується зі зростанням тиску, а до певного значення тиску зі зростанням температури коефіцієнт бокового тиску зростає. Зміну залежності після певного значення тиску можна пояснити початком руйнування матеріалу.



1 – 0,044 МПа; 2 – 0,152 МПа; 3 – 0,314 МПа; 4 – 0,476 МПа

Рисунок 3.25 – Залежність коефіцієнта бокового тиску від швидкості при різних тисках

На рисунку 3.25 зображено залежність коефіцієнта бокового тиску від швидкості при різному тиску. Бачимо що при збільшенні тиску залежність змінюється зі спадаючої на зростаючу, це можна пояснити тим, що у комбінації швидкості та високого тиску виділяється велика кількість тепла, що нагріває гранули та розм'якшує їх, що сприяє кращій передачі тиску на бокові поверхні.

3.5 Оцінка достовірності рівнянь регресії

Для оцінки достовірності рівнянь регресії застосуємо метод середньоквадратичної похибки [20].

Знаходимо середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{експ}} - Y_{\text{розрах}})^2}{n}}, \quad (3.5)$$

де $Y_{\text{експ}}$ та $Y_{\text{розрах}}$ – експериментальне та розрахункове значення досліджуваної величини; n – кількість дослідів.

Знаходимо середнє значення експериментально знайденого коефіцієнту тертя:

$$\bar{Y}_{\text{експ}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{\text{експ} i}, \quad (3.6)$$

Розраховуємо відносну похибку:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{Y}_{\text{експ}}} \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

3.5.1 Розрахунок похибки результатів рівняння регресії для полістиролу

У таблиці 3.11 представлені експериментальні та розрахункові значення коефіцієнту тертя для севілену.

Таблиця 3.11 – Експериментальне та розрахункове значення коефіцієнтів тертя

№ досліду	$K_{тр}$ експериментальне	$K_{тр}$ розрахункове
1	0,485	0,471
2	0,470	0,458
3	0,468	0,454
4	0,491	0,531
5	0,344	0,390
6	0,483	0,470
7	0,407	0,389
8	0,353	0,375

Знаходимо середнє квадратичне відхилення за формулою (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{експ} - Y_{розрах})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(0,485 - 0,471)^2 + (0,470 - 0,458)^2 + (0,468 - 0,454)^2 + (0,491 - 0,531)^2 + (0,344 - 0,290)^2 + (0,483 - 0,470)^2 + (0,407 - 0,389)^2 + (0,453 - 0,235)^2}{8}} = 0,028.$$

Знаходимо середнє значення експериментально знайденого коефіцієнту тертя за формулою (3.6):

$$\bar{Y}_{експ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{експ} = \frac{1}{8} (0,485 + 0,470 + 0,468 + 0,491 + 0,344 + 0,483 + 0,407 + 0,353) = 0,438.$$

Розраховуємо відносну похибку за формулою (3.9):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{Y}_{експ}} \cdot 100\% = \frac{0,028}{0,438} \cdot 100 = 6,30\%.$$

У таблиці 3.12 представлені експериментальні та розрахункові значення коефіцієнту бокового тиску для севілену..

Таблиця 3.12 – Експериментальне та розрахункове значення коефіцієнтів бокового тиску

№ досліду	$K_{б.т.}$ експериментальне	$K_{б.т.}$ розрахункове
1	0,324	0,281
2	0,336	0,351
3	0,312	0,306
4	0,274	0,320
5	0,336	0,275
6	0,302	0,349
7	0,345	0,306
8	0,235	0,263

Знаходимо середнє квадратичне відхилення за формулою (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{експ}} - Y_{\text{розрах}})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(0,324 - 0,281)^2 + (0,336 - 0,351)^2 + (0,312 - 0,306)^2 + (0,274 - 0,320)^2 + (0,336 - 0,275)^2 + (0,302 - 0,349)^2 + (0,345 - 0,306)^2 + (0,235 - 0,263)^2}{8}} = 0,039.$$

Знаходимо середнє значення експериментально знайденого коефіцієнту тертя за формулою (3.6):

$$\bar{Y}_{\text{експ}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{\text{експ}_i} = \frac{1}{8} (0,324 + 0,336 + 0,312 + 0,274 + 0,336 + 0,302 + 0,345 + 0,235) = 0,308.$$

Розраховуємо відносну похибку за формулою (3.9):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{Y}_{\text{експ}}} \cdot 100\% = \frac{0,039}{0,308} \cdot 100 = 12,8\% .$$

3.5.2 Розрахунок похибки результатів рівняння регресії для ПВГ

У таблиці 3.13 представлені експериментальні та розрахункові значення коефіцієнту тертя для ПВГ.

Таблиця 3.13 – Експериментальне та розрахункове значення коефіцієнтів тертя

№ досліду	$K_{тр}$ експериментальне	$K_{тр}$ розрахункове
1	0,482	0,475
2	0,511	0,573
3	0,477	0,471
4	0,489	0,501
5	0,447	0,362
6	0,433	0,415
7	0,461	0,440
8	0,464	0,459

Знаходимо середнє квадратичне відхилення за формулою (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{експ} - Y_{розрах})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(0,482 - 0,475)^2 + (0,511 - 0,573)^2 + (0,477 - 0,471)^2 + (0,489 - 0,501)^2 + (0,447 - 0,362)^2 + (0,433 - 0,415)^2 + (0,461 - 0,440)^2 + (0,464 - 0,459)^2}{8}} = 0,039.$$

Знаходимо середнє значення експериментально знайденого коефіцієнту тертя за формулою (3.6):

$$\bar{Y}_{експ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{експ} = \frac{1}{8} (0,482 + 0,511 + 0,477 + 0,489 + 0,447 + 0,433 + 0,461 + 0,464) = 0,471.$$

Розраховуємо відносну похибку за формулою (3.9):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{Y}_{експ}} \cdot 100\% = \frac{0,039}{0,471} \cdot 100 = 8,30\% .$$

У таблиці 3.14 представлені експериментальні та розрахункові значення коефіцієнту бокового тиску для ПВГ.

Таблиця 3.14 – Експериментальне та розрахункове значення коефіцієнтів бокового тиску

№ досліду	$K_{б.т.}$ експериментальне	$K_{б.т.}$ розрахункове
1	0,340	0,357
2	0,310	0,315
3	0,348	0,350
4	0,280	0,319
5	0,344	0,372
6	0,347	0,341
7	0,348	0,360
8	0,291	0,310

Знаходимо середнє квадратичне відхилення за формулою (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{експ}} - Y_{\text{розрах}})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(0,340 - 0,357)^2 + (0,310 - 0,315)^2 + (0,348 - 0,350)^2 + (0,280 - 0,319)^2 + (0,344 - 0,372)^2 + (0,347 - 0,341)^2 + (0,348 - 0,360)^2 + (0,291 - 0,310)^2}{8}} = 0,020.$$

Знаходимо середнє значення експериментально знайденого коефіцієнту тертя за формулою (3.6):

$$\bar{Y}_{\text{експ}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{\text{експ}_i} = \frac{1}{8} (0,340 + 0,310 + 0,348 + 0,280 + 0,344 + 0,347 + 0,348 + 0,291) = 0,326.$$

Розраховуємо відносну похибку за формулою (3.9):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{Y}_{\text{експ}}} \cdot 100\% = \frac{0,020}{0,326} \cdot 100 = 6,16\% .$$

3.5.3 Розрахунок похибки результатів рівняння регресії для ПВХ

У таблиці 3.15 представлені експериментальні та розрахункові значення коефіцієнту тертя для ПВХ.

Таблиця 3.15 – Експериментальне та розрахункове значення коефіцієнтів тертя

№ досліду	$K_{тр}$ експериментальне	$K_{тр}$ розрахункове
1	0,568	0,538
2	0,583	0,603
3	0,398	0,497
4	0,405	0,522
5	0,483	0,504
6	0,491	0,542
7	0,435	0,483
8	0,460	0,500

Знаходимо середнє квадратичне відхилення за формулою (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{експ} - Y_{розрах})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(0,568 - 0,538)^2 + (0,583 - 0,603)^2 + (0,398 - 0,497)^2 + (0,405 - 0,522)^2 + (0,483 - 0,504)^2 + (0,491 - 0,542)^2 + (0,435 - 0,483)^2 + (0,460 - 0,500)^2}{8}} = 0,063.$$

Знаходимо середнє значення експериментально знайденого коефіцієнту тертя за формулою (3.6):

$$\bar{Y}_{експ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{експ} = \frac{1}{8} (0,568 + 0,583 + 0,398 + 0,405 + 0,483 + 0,491 + 0,435 + 0,460) = 0,478.$$

Розраховуємо відносну похибку за формулою (3.9):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{Y}_{експ}} \cdot 100\% = \frac{0,063}{0,478} \cdot 100 = 13,26\%.$$

У таблиці 3.16 представлені експериментальні та розрахункові значення коефіцієнту бокового тиску для ПВХ.

Таблиця 3.16 – Експериментальне та розрахункове значення коефіцієнтів бокового тиску

№ досліду	$K_{б.т.}$ експериментальне	$K_{б.т.}$ розрахункове
1	0,342	0,325
2	0,336	0,314
3	0,283	0,311
4	0,302	0,335
5	0,286	0,237
6	0,352	0,370
7	0,280	0,280
8	0,246	0,234

Знаходимо середнє квадратичне відхилення за формулою (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{експ}} - Y_{\text{розрах}})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(0,342 - 0,325)^2 + (0,336 - 0,317)^2 + (0,283 - 0,311)^2 + (0,302 - 0,335)^2 + (0,286 - 0,237)^2 + (0,352 - 0,370)^2 + (0,280 - 0,280)^2 + (0,246 - 0,234)^2}{8}} = 0,026.$$

Знаходимо середнє значення експериментально знайденого коефіцієнту тертя за формулою (3.6):

$$\bar{Y}_{\text{експ}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{\text{експ}_i} = \frac{1}{8} (0,342 + 0,336 + 0,283 + 0,302 + 0,286 + 0,352 + 0,280 + 0,246) = 0,303.$$

Розраховуємо відносну похибку за формулою (3.9):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{Y}_{\text{експ}}} \cdot 100\% = \frac{0,026}{0,303} \cdot 100 = 8,60\% .$$

3.5.4 Розрахунок похибки результатів рівняння регресії для севілену

У таблиці 3.17 представлені експериментальні та розрахункові значення коефіцієнту тертя для севілену.

Таблиця 3.17 – Експериментальне та розрахункове значення коефіцієнтів тертя

№ досліду	$K_{тр}$ експериментальне	$K_{тр}$ розрахункове
1	0,596	0,595
2	0,612	0,635
3	0,417	0,532
4	0,425	0,549
5	0,507	0,559
6	0,515	0,571
7	0,457	0,518
8	0,483	0,525

Знаходимо середнє квадратичне відхилення за формулою (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{експ} - Y_{розрах})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(0,596 - 0,595)^2 + (0,612 - 0,635)^2 + (0,417 - 0,532)^2 + (0,425 - 0,549)^2 + (0,507 - 0,559)^2 + (0,515 - 0,571)^2 + (0,457 - 0,518)^2 + (0,483 - 0,525)^2}{8}} = 0,071.$$

Знаходимо середнє значення експериментально знайденого коефіцієнту тертя за формулою (3.6):

$$\bar{Y}_{експ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{експ_i} = \frac{1}{8} (0,596 + 0,612 + 0,417 + 0,425 + 0,507 + 0,515 + 0,457 + 0,483) = 0,502.$$

Розраховуємо відносну похибку за формулою (3.9):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{Y}_{експ}} \cdot 100\% = \frac{0,071}{0,502} \cdot 100 = 14,15\%.$$

У таблиці 3.18 представлені експериментальні та розрахункові значення коефіцієнту бокового тиску для севілену..

Таблиця 3.18 – Експериментальне та розрахункове значення коефіцієнтів бокового тиску

№ досліду	$K_{б.т.}$ експериментальне	$K_{б.т.}$ розрахункове
1	0,309	0,264
2	0,262	0,266
3	0,246	0,269
4	0,218	0,265
5	0,311	0,282
6	0,252	0,267
7	0,292	0,277
8	0,268	0,268

Знаходимо середнє квадратичне відхилення за формулою (3.5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{експ} - Y_{розрах})^2}{n}} = \sqrt{\frac{(0,309 - 0,264)^2 + (0,262 - 0,266)^2 + (0,246 - 0,269)^2 + (0,218 - 0,265)^2 + (0,311 - 0,282)^2 + (0,252 - 0,267)^2 + (0,292 - 0,277)^2 + (0,268 - 0,268)^2}{8}} = 0,028.$$

Знаходимо середнє значення експериментально знайденого коефіцієнту тертя за формулою (3.6):

$$\bar{Y}_{експ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{експ_i} = \frac{1}{8} (0,309 + 0,262 + 0,246 + 0,218 + 0,311 + 0,252 + 0,292 + 0,268) = 0,270.$$

Розраховуємо відносну похибку за формулою (3.9):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{Y}_{експ}} \cdot 100\% = \frac{0,028}{0,270} \cdot 100 = 10,28\% .$$

3.6 Вимірювання параметрів процесу

Температура циліндра реєструвалася терморегулятором МікРа 600 за допомогою штатної хромель-копелевої термопари (діапазон вимірюваних температур від мінус 50 до 550 °С). Попередньо прилад був відкалібрований при певних еталонних значеннях температури (температура кипіння води та температура плавлення льоду).



Рисунок 3.26 – Одноканальний регулятор температур МİKPa 600

Таблиця 3.19 – Технічні характеристики терморегулятора МİKPA600

Дискретність завдання температури, °C	1,0
Закон регулювання каналу нагріву	ПІД
Вихідний сигнал керування	ШІМ
Точність підтримання температури у встановленому режимі, °C	±0,5
Напруга живлення, В	110...250
Розміри, мм	48x48x120
Маса, кг	0,17

Вимірювання величини сили тертя здійснювалося за допомогою електронного динамометра DN-100 (рисунок 4.3, таблиця 4.4) який був встановлений за допомогою гнучких зв'язків між ротором електродвигуна та коробкою з полімером. Фіксація значень сили тертя відбувалась приблизно посередині траєкторії руху, коли він виходив на рівномірний та усталений режим.



Рисунок 3.27 – Електронний динамометр DN-100

Таблиця 3.20 – Технічні характеристики динамометра DN-100

Діапазон вимірювання, Н	0,1...200
Роздільна здатність, Н	0,1
Точність, %	±0,5
Час заміру, с	1-2

Швидкість обертання ротора вимірювалась за допомоги лазерного безконтактного тахометра Walcom DT 2234 C+.



Рисунок 3.28 – Лазерний безконтактний тахометр Walcom DT 2234 C+

Таблиця 3.21 – Технічні характеристики тахометра Walcom DT 2234 C+

Діапазон вимірювання, об/хв	2,5...9999
Роздільна здатність, об/хв	0,1
Точність, %	±0,05
Час заміру, с	1-2

3.6.1 Розрахунок похибок вимірювань фізичних величин

Визначення похибки результатів вимірювань фізичних величин здійснюємо за методичними вказівками [17-32].

Розрахунок похибки середнього результату прямих вимірювань фізичних величин виконуємо в такій послідовності.

Дослідно-інструментальну помилку середнього результату вимірювань фізичної величини \bar{x} визначають за залежністю

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2}, \quad (3.8)$$

де $\sigma_{\text{пвп}}$, $\sigma_{\text{пр}}$, $\sigma_{\text{окр}}$ – похибки первинного вимірювального перетворювача, приладу та округлення, відповідно:

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3}; \quad (3.9)$$

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right); \quad (3.10)$$

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}}, \quad (3.11)$$

де $\Delta_{\text{дпп}}$ – довідникова похибка приладу;

γ_{\circ} – клас точності приладу;

$D_{\text{вим}}$ – діапазон вимірювання приладу;

C – ціна поділки шкали (ступінь дискретизації цифрового відліку) приладу.

Випадкова помилка середнього результату становить

$$\theta(\bar{x}) = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}, \quad (3.12)$$

де x_i – i -й результат вимірювання;

ξ – коефіцієнт Стюдента, який залежить від довірчої імовірності P_d і кількості вимірювань n .

Повна похибка прямого вимірювання фізичної величини обчислюється за формулою

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\sigma_{\text{дип}}^2(\bar{x}) + \theta^2(\bar{x})}, \quad (3.13)$$

а значення фізичної величини становитиме (при обраній довірчій імовірності)

$$x = \bar{x} \pm \sigma(\bar{x}). \quad (3.14)$$

Відносна похибка результатів вимірювань складає

$$\varepsilon = \frac{\sigma(\bar{x})}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (3.15)$$

3.6.2 Розрахунок похибки вимірювання динамометром

Похибка первинного вимірювального перетворювача згідно з (3.9) дорівнює:

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дпш}}}{3} = \pm \frac{0,5}{3} = \pm 0,167 H,$$

де довідникова похибка приладу становить

$$\Delta_{\text{дпп}} = \delta \cdot D_{\text{вим}} = \pm 0,0025 \cdot (200 - 0,1) = \pm 0,5 H$$

де δ – відносна похибка приладу.

Похибка приладу згідно з (3.10) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,1}{100} \cdot (200 - 0,1) \right) = 0,067 H.$$

Похибка округлення згідно з (3.11) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{0,1}{\sqrt{12}} = 0,029 H.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (3.8)

$$\sigma_{\text{дип}}(\bar{n}) = \sqrt{\sigma_{\text{пви}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,167^2 + 0,067^2 + 0,029^2} = 0,18 H.$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання сили тертя. Для визначення випадкової похибки проведено декілька вимірювань при однаковій температурі і отримано такі результати: 12,1; 12,3; 11,8; 12,0; 12,1 H .

Середнє арифметичне значення становить

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i = \frac{1}{5} (12,1 + 12,3 + 11,8 + 12,0 + 12,1) = 12,06 H.$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\theta(\bar{n}) = \xi \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m (\bar{n} - n_i)^2} = 2,8 \times \\ \times \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(12,1-12,06)^2 + (12,3-12,06)^2 + (11,8-12,06)^2 + (12,0-12,06)^2 + (12,1-12,06)^2]} = \\ = 0,235 \text{ Н},$$

де $\xi=2,8$ – значення коефіцієнта Стюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$.

Повна похибка прямого вимірювання (див. (3.13))

$$\sigma(\bar{N}) = \sqrt{\sigma_{\text{дип}}^2(\bar{N}) + \theta^2(\bar{N})} = \sqrt{0,18^2 + 0,235^2} = 0,29 \text{ Н}.$$

Значення відповідно до (3.14) становить

$$N = \bar{N} \pm \sigma(\bar{N}) = 12,06 \pm 0,29 \text{ Н при } P_d = 0,95.$$

Відносна похибка результатів вимірювань складає відповідно до (3.15)

$$\varepsilon = \frac{0,29}{12,06} \cdot 100\% = 2,4\%.$$

3.6.3 Розрахунок похибки вимірювання температури

Похибка первинного вимірювального перетворювача згідно з (3.9) дорівнює

$$\sigma_{\text{пвп}} = \frac{\Delta_{\text{дип}}}{3} = \pm \frac{2,5}{3} = \pm 0,833^\circ\text{C},$$

де довідникова похибка хромель-копелевої терморпарі $\Delta_{\text{дип}} = 2,5^\circ\text{C}$.

Похибка приладу згідно з (3.10) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,5}{100} \cdot (1300 - (-50)) \right) = 2,25^{\circ}\text{C}.$$

Похибка округлення згідно з (3.11) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,289^{\circ}\text{C}.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (3.8)

$$\sigma_{\text{дип}}(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{пви}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,833^2 + 2,25^2 + 0,289^2} = 2,417^{\circ}\text{C}.$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання температури. Для визначення випадкової похибки проводили декілька вимірювань температури робочої поверхні після її нагрівання, які становили 82, 81, 78, 81, 83 °C.

Середнє арифметичне температури становить

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = \frac{1}{5} (82 + 81 + 78 + 81 + 83) = 81^{\circ}\text{C}.$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\begin{aligned} \theta(\bar{T}) &= \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{T} - T_i)^2} = 2,8 \times \\ &\times \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(82-81)^2 + (81-81)^2 + (78-81)^2 + (81-81)^2 + (83-81)^2]} = 2,34^{\circ}\text{C}, \end{aligned}$$

де $\xi=2,8$ – значення коефіцієнта Стьюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$.

Повна похибка прямого вимірювання температури (див. (3.13)):

$$\sigma(\bar{T}) = \sqrt{\sigma_{\text{дип}}^2(\bar{T}) + \theta^2(\bar{T})} = \sqrt{2,417^2 + 2,34^2} = 3,36 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Значення температури відповідно до (3.14) становить

$$T = \bar{T} \pm \sigma(\bar{T}) = 81 \pm 3,36 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ при } P_d = 0,95.$$

Відносна похибка результатів вимірювань складає відповідно до (3.15)

$$\varepsilon = \frac{3,36}{81} \cdot 100\% = 4,15\%.$$

3.6.4 Розрахунок похибки вимірювання швидкості обертання

Похибка первинного вимірювального перетворювача згідно з (3.9) дорівнює

$$\sigma_{\text{пп}} = \frac{\Delta_{\text{дпп}}}{3} = \pm \frac{0,05}{3} = \pm 0,017 \text{ об/хв},$$

де довідникова похибка тахометра $\Delta_{\text{дпп}} = 0,05 \text{ об/хв}$.

Похибка приладу згідно з (3.10) дорівнює

$$\sigma_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma_{\circ}}{100} D_{\text{вим}} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{0,05}{100} \cdot (999 - 2,5) \right) = 0,166 \text{ об/хв}.$$

Похибка округлення згідно з (3.11) становить

$$\sigma_{\text{окр}} = \frac{C}{\sqrt{12}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,289 \text{ об/хв}.$$

Значення дослідно-інструментальної помилки визначаємо згідно з (3.8)

$$\sigma_{\text{дін}}(\bar{n}) = \sqrt{\sigma_{\text{пвп}}^2 + \sigma_{\text{пр}}^2 + \sigma_{\text{окр}}^2} = \sqrt{0,017^2 + 0,166^2 + 0,289^2} = 0,334 \text{ об/хв.}$$

Тепер визначимо величину випадкової помилки середнього результату вимірювання швидкості обертання. Для визначення випадкової похибки проводили декілька вимірювань швидкості обертання ротора, які становили 50,1, 50,0, 50,1, 49,9, 50,0 °С.

Середнє арифметичне швидкості обертання ротора становить

$$\bar{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i = \frac{1}{5} (50,1 + 50 + 49,9 + 50,1 + 50) = 50,02 \text{ об/хв.}$$

Тоді випадкова помилка середнього результату становить

$$\theta(\bar{n}) = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{n} - n_i)^2} = 2,8 \times \\ \times \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} [(50,1 - 50,02)^2 + (50 - 50,02)^2 + (49,9 - 50,02)^2 + (50,1 - 50,02)^2 + (50 - 50,02)^2]} = 0,0106 \text{ об/хв,}$$

де $\xi=2,8$ – значення коефіцієнта Стюдента для $P_d = 0,95$ і $n = 5$.

Повна похибка прямого вимірювання швидкості обертання (див. (3.13)):

$$\sigma(\bar{n}) = \sqrt{\sigma_{\text{дін}}^2(\bar{n}) + \theta^2(\bar{n})} = \sqrt{0,334^2 + 0,010^2} = 0,334 \text{ об/хв.}$$

Значення обертання ротора відповідно до (3.14) становить

$$T = \bar{T} \pm \sigma(\bar{T}) = 50,01 \pm 0,334 \text{ об/хв при } P_d = 0,95.$$

Відносна похибка результатів вимірювань складає відповідно до (3.15)

$$\varepsilon = \frac{0,334}{50,01} \cdot 100\% = 0,67\% .$$

3.7 Висновки до розділу 3

У результаті виконаної роботи було:

- створено експериментальну установку для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипучого матеріалу та коефіцієнту бокового тиску.

- експериментально встановлено залежності тертя гранульованого полімерного матеріалу по металевій поверхні робочих органів екструдера, а також коефіцієнту бокового тиску від тиску, температури, швидкості та висоти шару гранул для полістиролу, ПВГ, ПВХ та севілену.

- Для полістиролу залежність коефіцієнту тертя: від тиску є спадаючою; залежність від швидкості тертя є спадаючою; залежність від температури є зростаючою; залежність від висоти шару гранул – відсутня.

- Для ПВГ залежність коефіцієнту тертя: від тиску є спадаючою; від швидкості тертя на відміну від полістиролу є зростаючою; від температури зростаючою; від висоти шару гранул не залежить.

- Для севілену залежність коефіцієнту тертя: від тиску є спадаючою; від швидкості – зростаючою; від температури – зростаючою; від висоти шару гранул при певних значеннях тиску – спадаючою;

- Для ПВХ залежність коефіцієнту тертя: від тиску є спадаючою; від швидкості є зростаючою; від температури – зростаючою; від висоти шару гранул спадаючою.

- експериментально встановлені залежності коефіцієнту бокового тиску. Бачимо, що залежності схожі для усіх досліджуваних матеріалів, а саме у випадку при підвищенні температури коефіцієнт бокового тиску зростає, при підвищенні швидкості – спадає, при підвищенні тиску та висоти шару гранул – також спадає;

- розраховані значення похибок вимірювання не перевищують допустимих.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ ГРАНУЛИ НА КОЕФІЦІЄНТ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ

4.1 Програмне забезпечення

У якості програмного забезпечення для моделювання сипучого матеріалу було обрано EDEM [3].

Програмне забезпечення EDEM було обрано через ряд його переваг:

- симуляція будь яких матеріалів: широкий спектр фізичних моделей, імітація будь-якого типу форми матеріалу;
- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для швидкого налаштування моделювання;
- висока продуктивність;
- велика бібліотека матеріалів;
- індивідуальна фізика з універсальним інтерфейсом для складних симуляцій та покращеної поведінки матеріалу (липкі тверді частинки, розриви, гнучкі волокна тощо);
- вбудована система розрахунків (CAE) в поєднанні з скінченно-елементним аналізом (FEA), багатооб'єктною динамікою (MBD) та обчислювальною гідродинамікою (CFD).

4.2 Визначення коефіцієнту внутрішнього тертя для гранул різної форми

Для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя необхідно знайти кут природнього укосу тангенс якого дорівнює коефіцієнту внутрішнього тертя сипучого матеріалу [15].

$$K_{тр.вн.} = tg \alpha . \quad (4.1)$$

Для знаходження кута природнього укосу застосуємо метод найменших квадратів [21].

Суть методу заключається у знаходженні коефіцієнтів лінійної залежності, при яких функція двох змінних a та b $F(a,b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$ приймає найменше значення. Тобто, при даних a та b сума квадратів відхилень експериментальних даних від знайденої прямої буде найменшим. Таким чином, рішення задачі зводиться до знаходження екстремуму функції двох змінних.

Щоб вивести формули для знаходження коефіцієнтів складається та вирішується система рівнянь з двома невідомими. Знаходимо частинні похідні функції $F(a,b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$ по змінним a та b та прирівнюємо їх до нуля.

$$\begin{cases} \frac{\partial F(a,b)}{\partial a} = 0, \\ \frac{\partial F(a,b)}{\partial b} = 0. \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))x_i = 0, \\ -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b)) = 0. \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n b = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i, \\ a \sum_{i=1}^n x_i + nb = \sum_{i=1}^n y_i. \end{cases} ; \quad (4.2)$$

Вирішуємо отриману систему рівнянь та отримуємо формули для знаходження коефіцієнтів по методу найменших квадратів.

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n}. \end{cases} ; \quad (4.3)$$

При даних a та b функція $F(a,b) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$ приймає найменше значення.

Для того, щоб застосувати даний метод було створено програму програма, яка складена на мові програмування Qbasic (Додаток Б) [1].

Змодельованим гранулам було надано властивості поліетилену.

1) Визначення коефіцієнту внутрішнього тертя для сферичних гранул

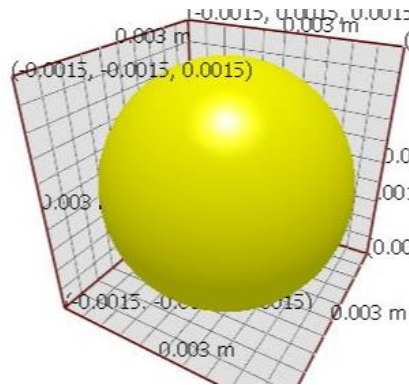


Рисунок 4.1 – Сферична гранула

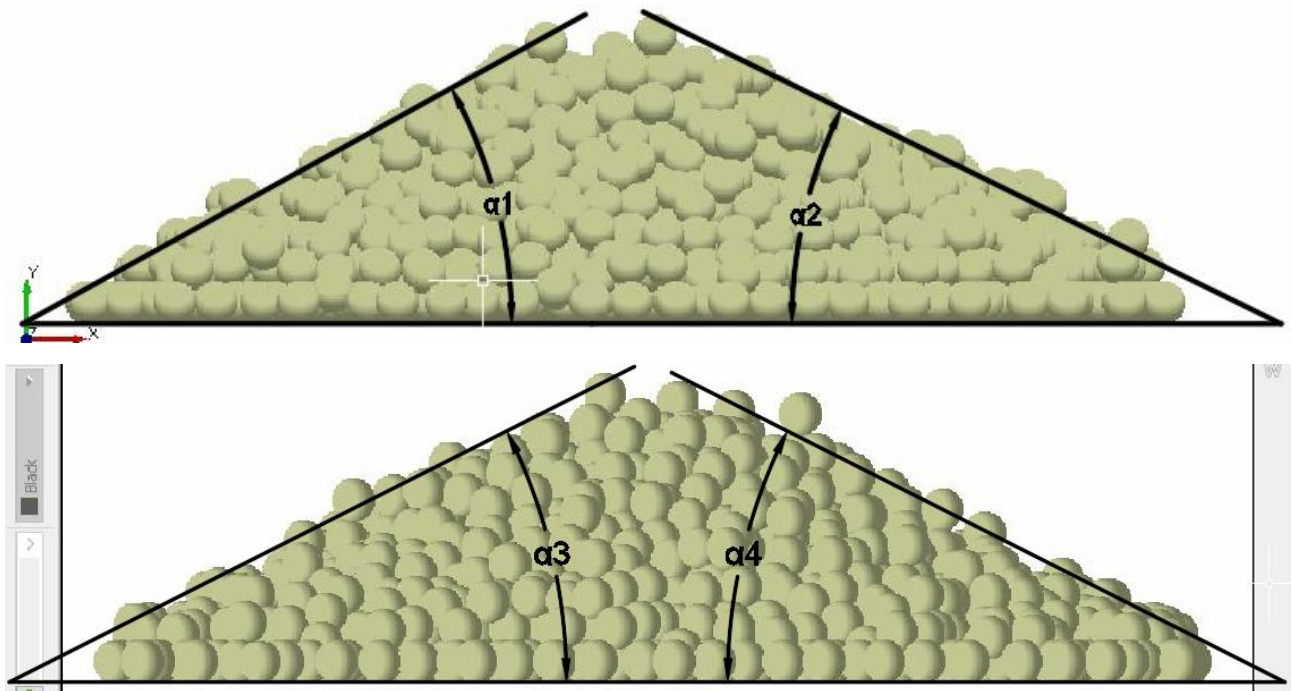


Рисунок 4.2 – Кути природнього укосу для сферичних гранул

У таблиці 4.1 вказані чотири кути природнього укосу для сферичних гранул, поміряні з двох різних сторін.

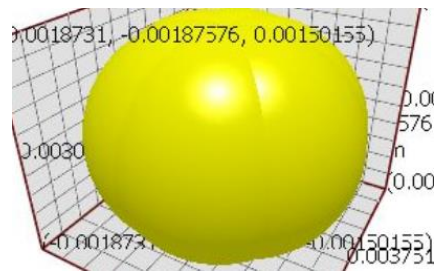
Таблиця 4.1 – Кути природнього укусу для сферичних гранул

Номер кута	Кут природнього укусу α , °
α_1	29
α_2	26
α_3	27
α_4	27
$\alpha_{\text{середнє}}$	27,25

Коефіцієнт внутрішнього тертя для сферичних гранул дорівнює за (4.1):

$$K_{\text{тр.вн.}} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{серед}} = \operatorname{tg}(27,25) = 0,515.$$

2) Визначення коефіцієнту внутрішнього тертя для гранули із співвідношенням довжини до діаметра $L/D = 1,15$

Рисунок 4.3 – Гранула із співвідношенням $L/D = 1,15$

У таблиці 4.2 вказані чотири кути природнього укусу для сферичних гранул, поміряні з двох різних сторін.

Таблиця 4.2 – Кути природнього укусу для гранул зі співвідношенням $L/D = 1,15$

Номер кута	Кут природнього укусу α , °
α_1	29
α_2	28
α_3	27
α_4	29
$\alpha_{\text{середнє}}$	28,25

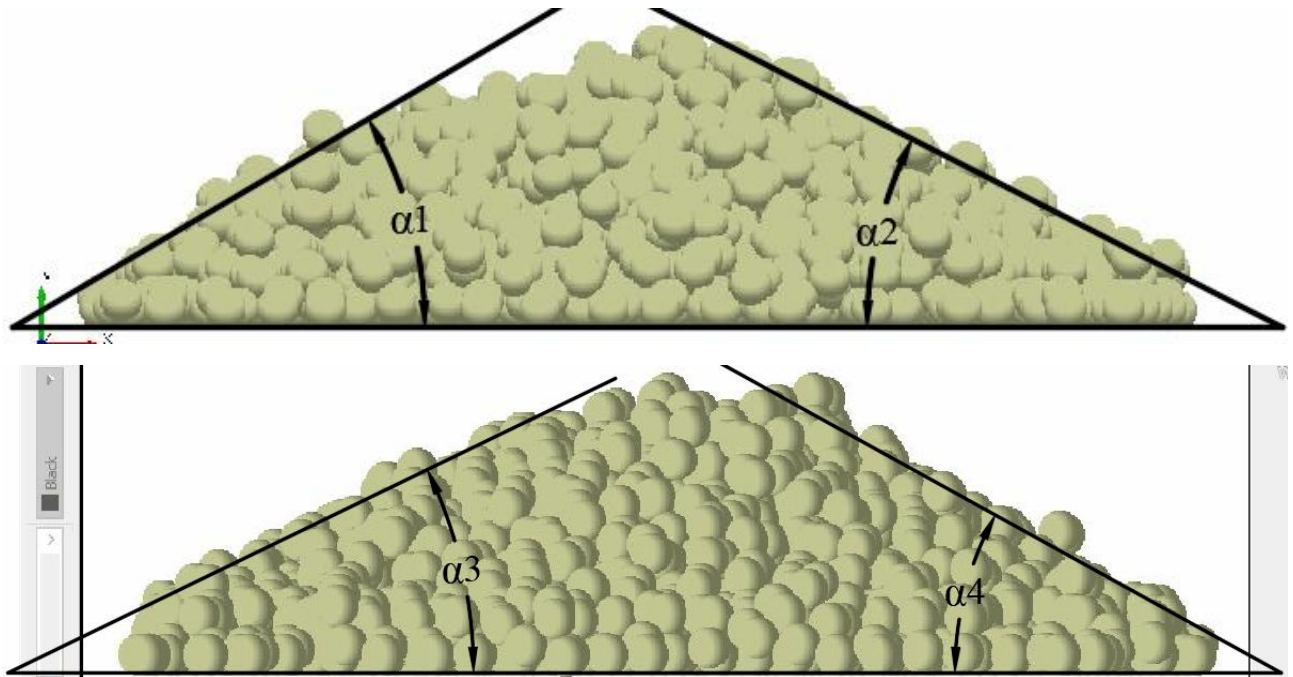


Рисунок 4.4 – Кути природнього укосу для гранул з із співвідношенням $L/D = 1,15$

Коефіцієнт внутрішнього тертя для гранул із співвідношенням $L/D = 1,15$ дорівнює за (4.1):

$$K_{\text{тр.вн.}} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{серед}} = \operatorname{tg}(28,25) = 0,537.$$

3) Визначення коефіцієнту внутрішнього тертя для гранули із співвідношенням довжини до діаметра $L/D = 1,5$

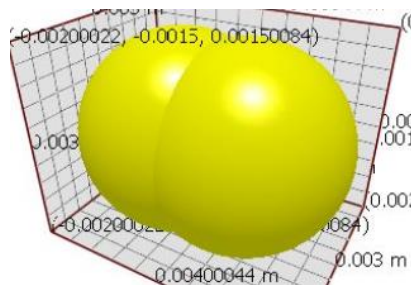


Рисунок 4.5 – Гранула із співвідношенням $L/D = 1,5$

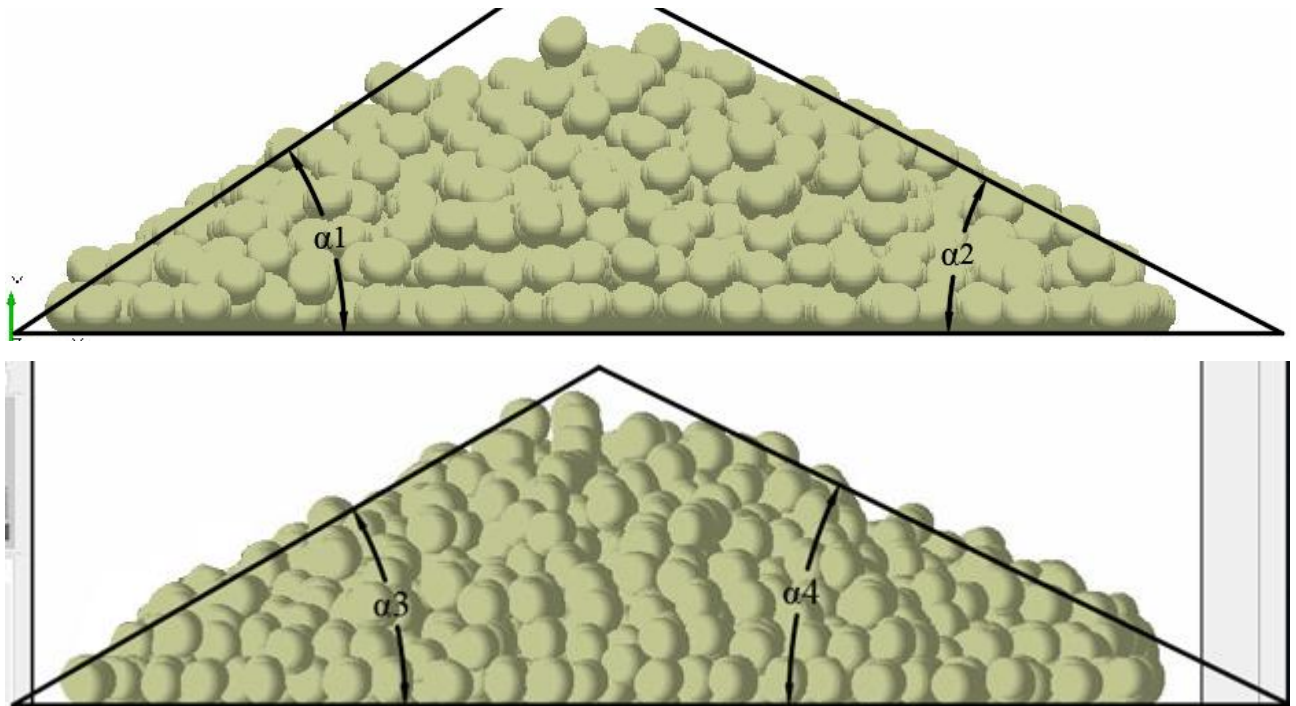


Рисунок 4.6 – Кути природнього укосу для гранул з із співвідношенням $L/D = 1,5$

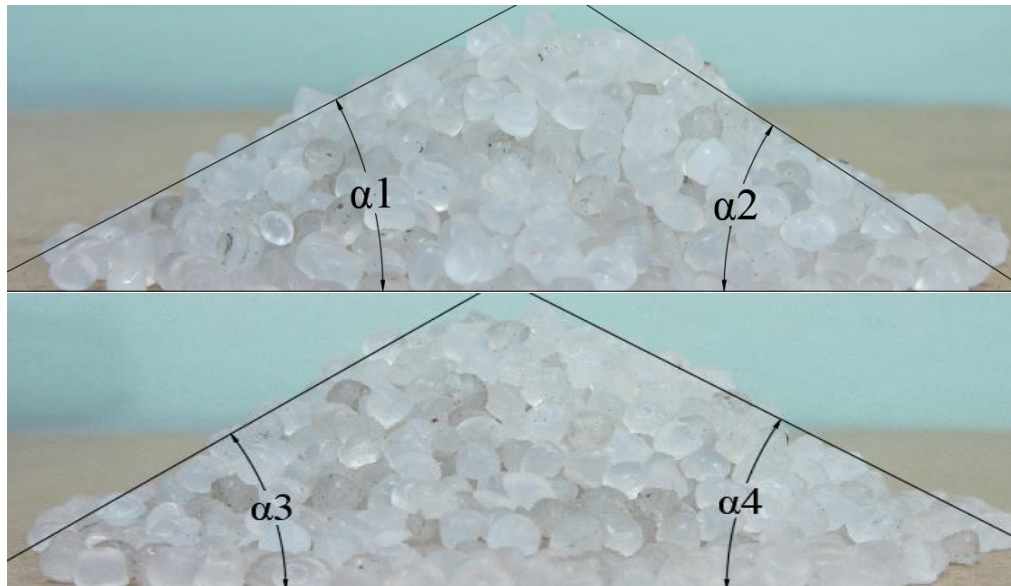


Рисунок 4.7 – Кути природнього укосу для гранул ПВГ

У таблиці 4.3 вказані чотири кути природнього укосу поміряні з двох різних сторін.

Таблиця 4.3 – Кути природнього укусу для гранул зі співвідношенням $L/D = 1,5$

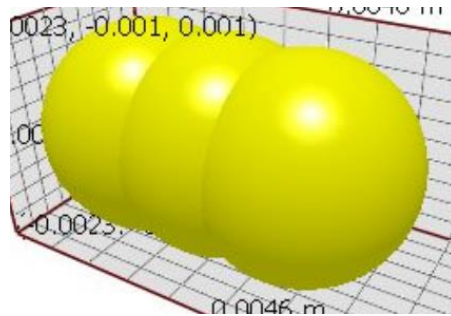
Номер кута	Кут природнього укусу для спроектованих гранул α , °	Кут природнього укусу для гранул ПВГ α , °
α_1	30	28
α_2	28	30
α_3	30	31
α_4	29	31
$\alpha_{\text{середнє}}$	29,25	30

Коефіцієнт внутрішнього тертя для гранул із співвідношенням $L/D = 1,5$ дорівнює за (4.1):

$$K_{\text{тр.вн.теор.}} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{серед}} = \operatorname{tg} (29,25) = 0,560.$$

$$K_{\text{тр.вн.експ.}} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{серед}} = \operatorname{tg} (30) = 0,577$$

4) Визначення коефіцієнту внутрішнього тертя для гранули із співвідношенням довжини до діаметра $L/D = 2$

Рисунок 4.8 – Гранула із співвідношенням $L/D = 2$

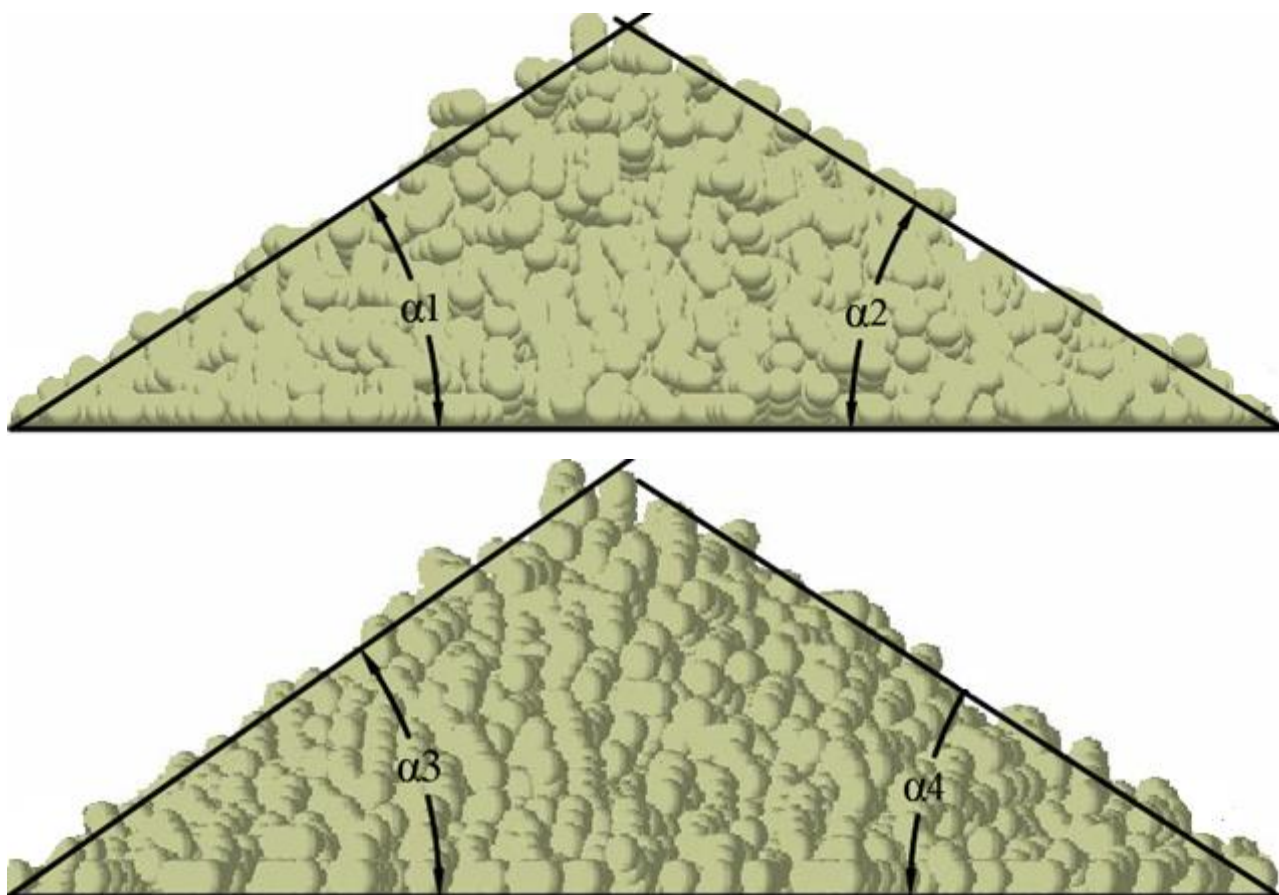


Рисунок 4.9 – Кути природнього укосу для гранул з із співвідношенням $L/D = 2$

Таблиця 4.4 – Кути природнього укосу для гранул зі співвідношенням $L/D = 2$

Номер кута	Кут природнього укосу $\alpha, ^\circ$
α_1	33
α_2	32
α_3	33
α_4	34
$\alpha_{\text{середнє}}$	33

Коефіцієнт внутрішнього тертя для гранул із співвідношенням $L/D = 2$ дорівнює за (4.1):

$$K_{\text{тр.вн.}} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{серед}} = \operatorname{tg}(33) = 0,649.$$

4.3 Аналіз отриманих результатів

У таблиці 4.5 наведено порівняння кута природнього укосу та коефіцієнту внутрішнього тертя для гранул різної форми

Таблиця 4.5 – Порівняння гранул різної геометрії

Тип гранули	Кут природнього укосу α , °	Коефіцієнт внутрішнього тертя, $K_{тр.вн.}$
$L/D = 1$ (сферичні гранули)	27,25	0,515
$L/D = 1,15$	28,25	0,537
$L/D = 1,5$	29,25	0,560
$L/D = 2$	33	0,649

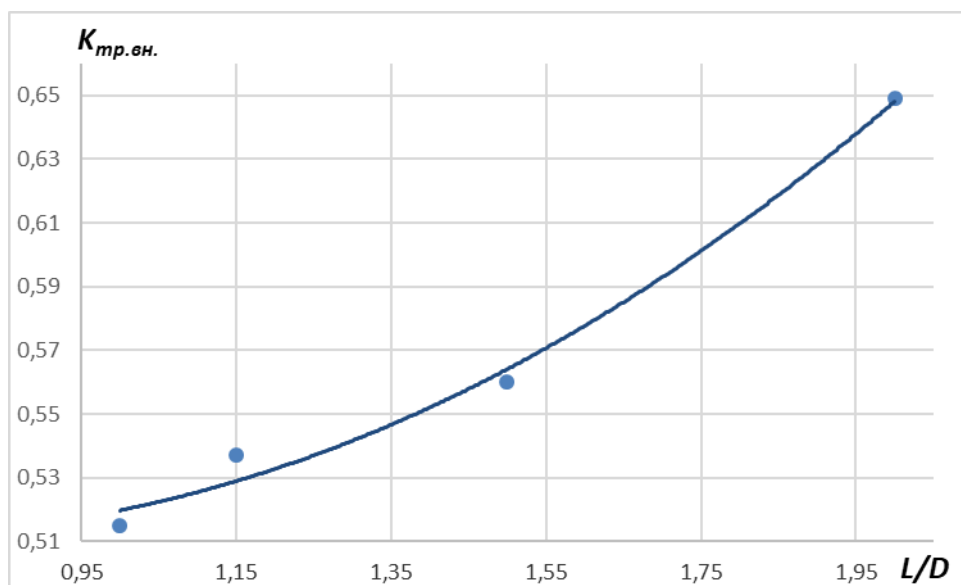


Рисунок 4.10 – Залежність коефіцієнту внутрішнього тертя від співвідношення довжини гранули до її діаметра

На рисунку 4.10 зображено залежність коефіцієнту внутрішнього тертя від співвідношення діаметра гранули до її довжини L/D . Бачимо, що при збільшенні співвідношення L/D коефіцієнт внутрішнього тертя зростає.

4.4 Дослідження процесу транспортування полімеру в екструдері

Нами було проведено дослідження процесу транспортування полімеру у зоні завантаження екструдера (рис. 4.11) для гранул наступних полімерів: поліетилен високої густини, севілен, полістирол та полівінілхлорид.

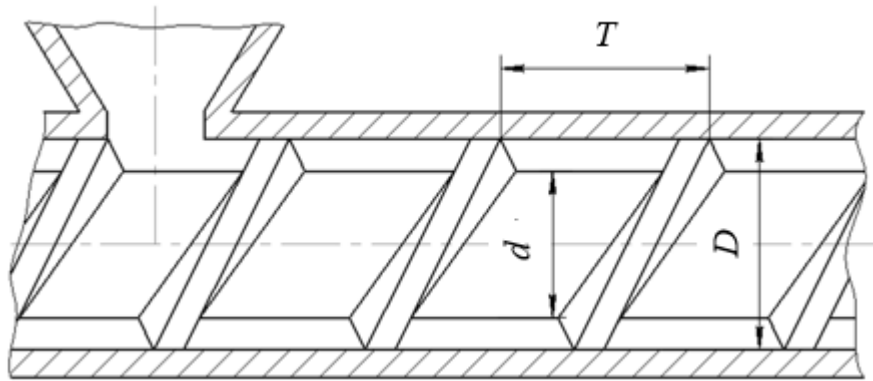


Рисунок 4.11 – Основні розміри зони завантаження екструдера

На рисунку 4.11 $T = 35$ мм – крок гвинтової нарізки; $d = 25$ мм – діаметр осердя; $D = 47$ мм – діаметр черв'яка.

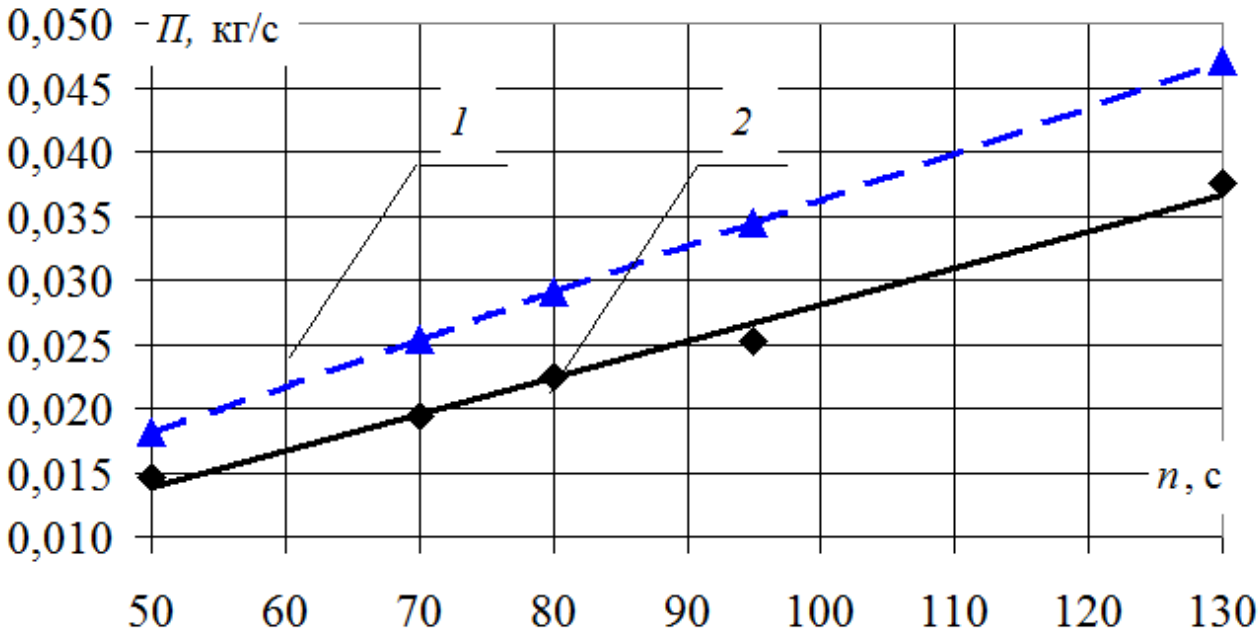
На рисунках 4.12 – 4.14 зображено апроксимуючі криві, що показують залежність масової продуктивності зони живлення екструдера Π , кг/с та потужності процесу N , Вт від частоти обертання черв'яка n , об/с. Криві побудовані з використанням лінійної або поліноміальної апроксимації. Середнє значення достовірності апроксимації кривих не нижче 0,95.

Дані, для побудови залежності на основі теоретичних даних, були отримані за формули [23-36] :

$$\Pi = \frac{\pi T n (D^2 - d^2)}{4 \cdot 60}, \quad (4.4)$$

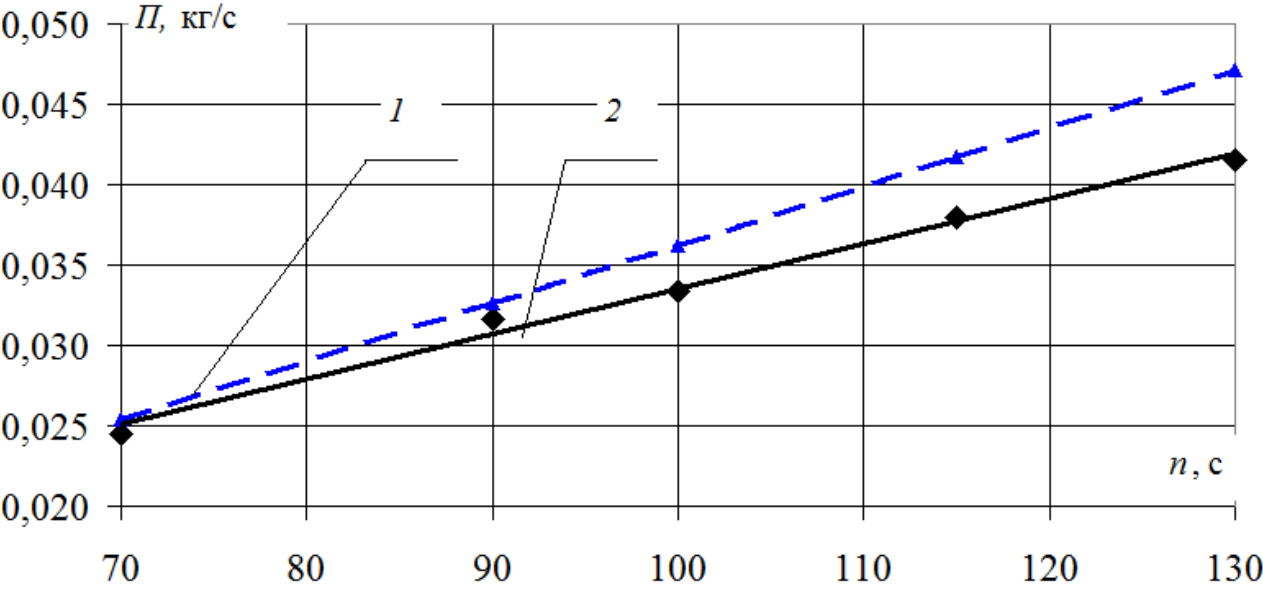
де T – крок гвинтової навивки, м; n – частота обертання ротора, об/хв; D – діаметр черв'яка, м; d – діаметр осердя, м.

На рисунку 4.12 зображено залежність масової продуктивності зони живлення екструдера для севілену та полівінілхлориду так, як їх залежності збігаються, тому вони зображені на одному графіку.



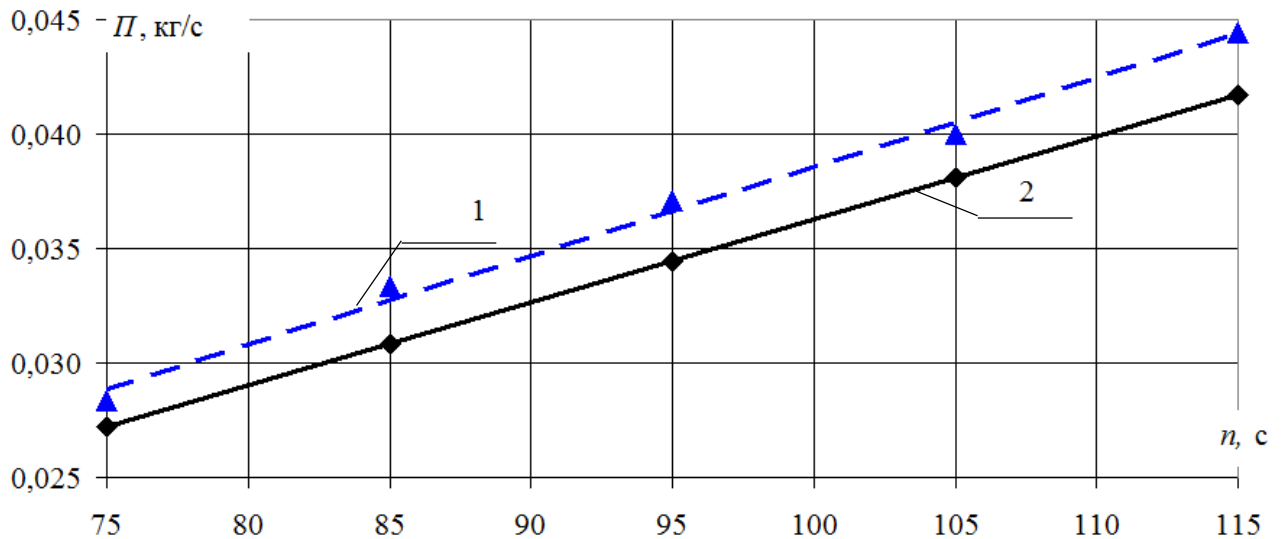
1 – дані, отримані теоретично; 2 – експериментальні дані

Рисунок 4.12 – Залежність масової продуктивності зони живлення екструдера Π , кг/с від частоти обертання n , об/с для севілену та ПВХ



1 – дані, отримані теоретично; 2 – експериментальні дані

Рисунок 4.13 – Залежність масової продуктивності зони живлення екструдера Π , кг/с від частоти обертання n , об/с для полістиролу



1 – дані, отримані теоретично; 2 – експериментальні дані

Рисунок 4.14 – Залежність масової продуктивності зони живлення екструдера Π , кг/с від частоти обертання n , об/с для ПВГ

Із зазначених кривих видно, що масова продуктивність зони живлення екструдера лінійно залежить від збільшення частоти обертання черв'яка, прямопропорційно збільшуючись при збільшенні частоти. Зауважимо, що значення, які отримали теоретичним шляхом більші за значення, які отримали експериментальним шляхом для усіх матеріалів.

Також бачимо, що зі збільшенням частоти обертання розбіжність між теоретичними та експериментальними даними зростає, причому для ПВХ та севілену (рис. 4.12) початкова відмінність складає близько 17 %, а кінцева – близько 26 %; для полістиролу – початкова відмінність приблизно 4 %, кінцева близько 12 %; для ПВГ – початкова відмінність складає близько 5 %, максимальне – близько 7 %.

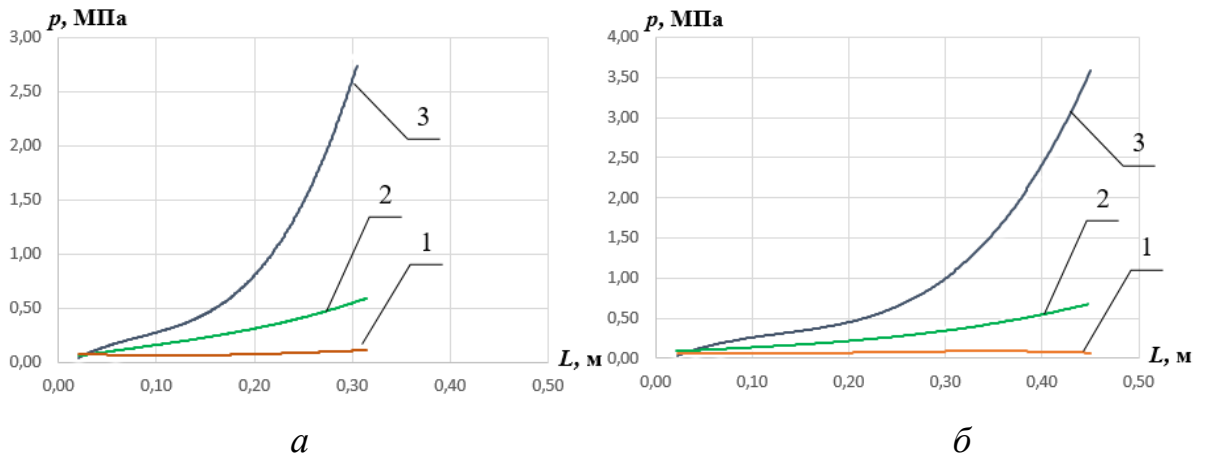
Вказані розбіжності можуть бути пояснені деформацією полімерних гранул та потраплянням у зазор між черв'яком та корпусом. Це також створює стрибки у споживанні потужності приводом, а також деформації та подрібнення деякого відсотка гранул.

4.5 Числове моделювання процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера

Для аналізу обраної моделі було виконано числове моделювання процесу подачі екструдерів з діаметром 63 та 90 мм для переробки поліетилену високого тиску марки 15803-020.

Для екструдера з діаметром черв'яка 63 мм розрахунки здійснювали для наступних умов: масова продуктивність $G_M=150$ кг/год, частота обертання $n_{\text{ч}}=150$ хв⁻¹, відношення коефіцієнтів тертя $f_{\text{ц}}/f_{\text{ч}}=1.1...1.3$, а для екструдера з діаметром черв'яка 90 мм – відповідно $G_M=150$ кг/год, $n_{\text{ч}}=68$ хв⁻¹, $f_{\text{ц}}/f_{\text{ч}}=1.1...1.3$.

На рисунку 4.15 приведені залежності тиску по довжині зони подачі для обох екструдерів. Початкове значення тиску на виході зони завантаження задавалося рівним 20 МПа. В процесі розрахунку у напрямку від кінця до початку зони завантаження визначали зміну тиску по довжині черв'яка. Якщо при цьому кінцеве значення тиску на вході в зону живлення перевищувало 0,1 МПа (при відсутності в завантажувальному бункері екструдера пристрою, що примусово подає гранули під тиском), то значення тиску на виході зони зменшували і розрахунки повторювали. Така методика розрахунку дозволяє вираховувати значення тиску на виході зони завантаження, яке вона може забезпечити при заданій геометрії черв'яка і співвідношенні коефіцієнтів тертя $f_{\text{ц}}$ та $f_{\text{ч}}$.



1 – 1.1; 2 – 1.2; 3 – 1.3

Рисунок 4.15 – Зміна тиску по довжині зони завантаження для екструдерів з діаметром черв'яка 63 мм (а) та 90 мм (б) при різних значеннях $f_{\text{ц}}/f_{\text{ч}}$

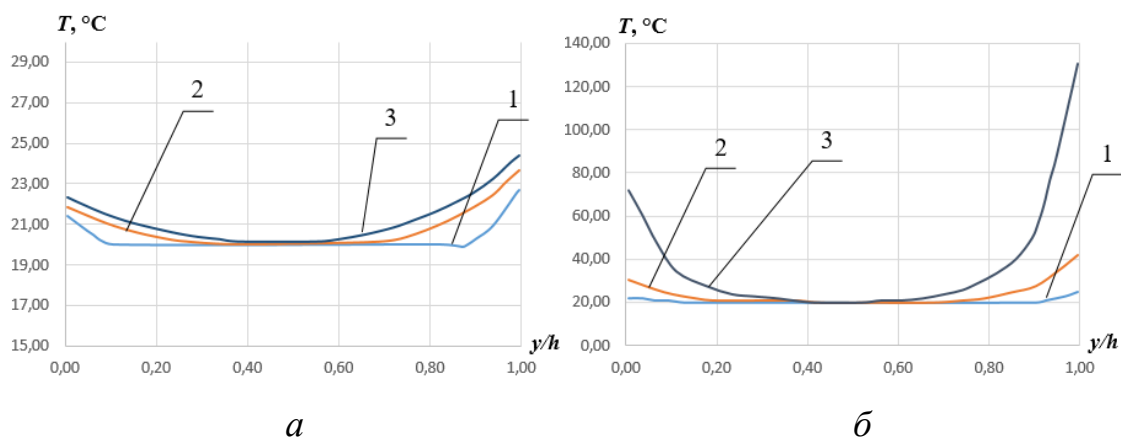
Із рисунка 4.15 видно, що співвідношення $f_{\text{ц}}/f_{\text{ч}}$ суттєво впливає на характер росту тиску. При малих значеннях цього співвідношення характер зміни тиску наближається до лінійного. Це, в першу чергу, характерно для екструдерів великих типорозмірів з гладким циліндром та відносно глибокою нарізкою черв'яка, в яких продуктивність суттєво залежить від супротиву екструзійної головки.

Збільшення співвідношення $f_{\text{ц}}/f_{\text{ч}}$ приводить до різкого зросту тиску в кінці зони подачі на ділянці відносно не великої довжини. Результати розрахунків показали, що при малих відношеннях $f_{\text{ц}}/f_{\text{ч}}$ попередньо узяті значення 20 МПа в кінці зони живлення не досягається, отже буде мати місце зміна профіля тиску і пов'язане з ним зміна продуктивності та температури розплаву по усій довжині черв'яка. Таким чином, при проектуванні одночерв'ячних екструдерів необхідно враховувати взаємний вплив всіх функціональних зон екструдера, а також супротив екструзійної головки один на одного.

В екструдерах з канавками в зоні подачі матеріал, який рухається в цих канавках, перешкоджає обертанню сусідніх гранул, що збільшує значення кута ω та еквівалентне значення коефіцієнта тертя $f_{\text{ц}}$. Таким чином, у таких екструдерах внаслідок суттєвого зросту тиску на невеликій ділянці утворюється стиснена пробка твердого термопластичного розплаву, положення якої може

змінюватися по довжині циліндра в залежності від значення супротиву наступних зон. При збільшенні вказаного супротиву пробка зміщується в сторону завантажувального бункера, а при його зменшенні – в сторону зони плавлення. Таким чином, наявність канавок на поверхні циліндра в зоні завантаження сприяє створенню тиску без суттєвого зменшення продуктивності і при досить великому супротиві наступних зон. Збільшення типорозміру екструдера вимагає і збільшення глибини нарізки в зоні подачі, а тому вплив цих канавок в таких екструдерах зменшується.

На рисунку 4.16 приведені криві зміни температури по радіусу черв'яка (глибині нарізки) для обох екструдерів при різних значеннях відношення коефіцієнтів тертя. Із рисунка 4.16 видно, що зі збільшенням відношення $f_{ц}/f_{ч}$ в області різкого збільшення тиску внаслідок тертя виділяється суттєва кількість енергії. При цьому поблизу поверхонь черв'яка та циліндра температура термопластичного матеріалу суттєво зростає, що при відсутності інтенсивного охолодження може призвести до передчасного плавлення полімеру, заповнення розплавом канавок та зниженню їх ефективності.

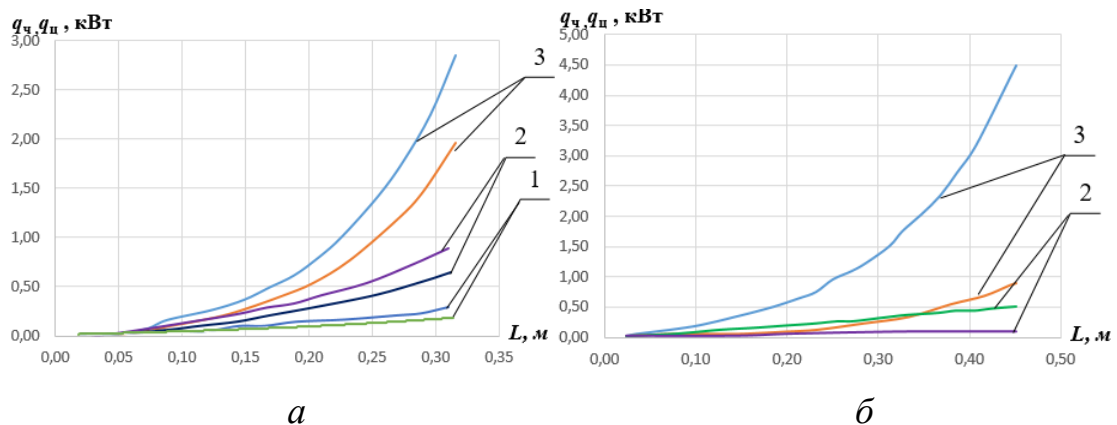


1 – $L=0.02$ м; 2 – $L=0.24$ м; 3 – $L=0.452$ м

Рисунок 4.16 – Залежність температури полімеру по безрозмірній висоті нарізки черв'яка y/h для екструдера з діаметром 90 мм (а – $f_{ц}/f_{ч}=1.2$; б – $f_{ц}/f_{ч}=1.3$)

Характер зміни теплових потоків поблизу поверхонь черв'яка і циліндра по довжині зони живлення наведено на рисунку 4.17, з якого видно, що найбільші енергетичні витрати мають місце в областях високого тиску. При цьому

необхідно відзначити, що в математичній моделі зроблено припущення про поширення теплового потоку в стінці циліндра тільки в її радіальному напрямку. У реальних же умовах внаслідок можливого перерозподілу теплоти уздовж циліндра можна очікувати визначеного вирівнювання теплового потоку, а тому зміна температури термопластичного матеріалу при підвищеному тиску не буде такою значною, як це впливає з теоретичного рішення. Однак, в будь-якому випадку для запобігання передчасному плавленню полімеру зону подачі необхідно охолоджувати.



1 – 1.1; 2 – 1.2; 3 – 1.3

Рисунок 4.17 – Залежність теплових потоків q_{ch} та q_{cp} по довжині зони живлення для екструдерів з діаметром черв'яка 63 мм (а) та 90 мм (б) при різних значеннях f_{cp}/f_{ch}

На рисунку 4.18 приведені температурні поля термопластичного матеріалу при переробці в екструдері з діаметром черв'яка 90 мм, побудовані для різних значень відношення коефіцієнтів тертя.

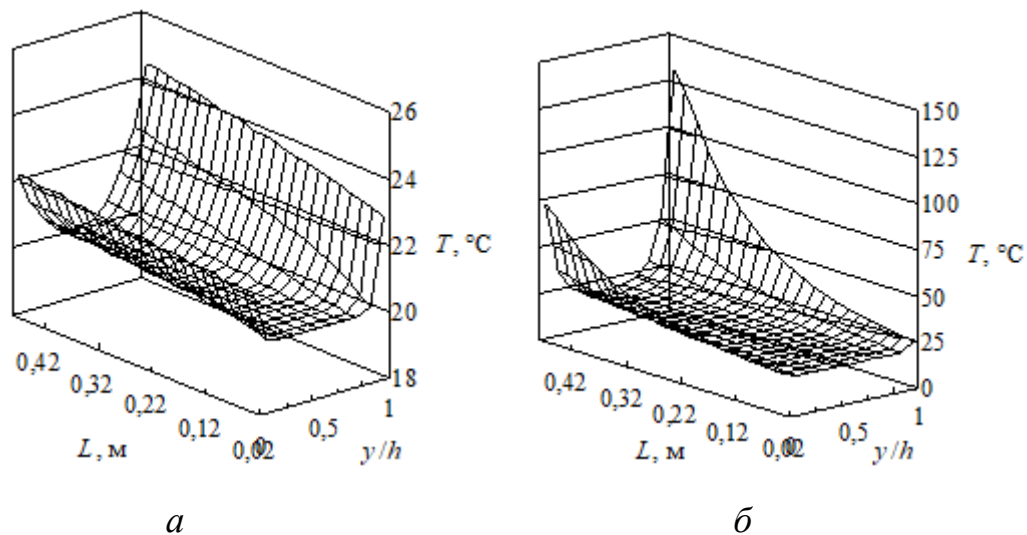


Рисунок 4.18 – Температурні поля в зоні живлення для екструдера з діаметром черв'яка 90 мм при значеннях f_w/f_{ch} : *a* – 1.2; *б* – 1.3

Із рисунка 4.18 видно, що суттєве підвищення температури має місце тільки поблизу поверхонь тертя, в той час, як основна маса термопластичного матеріалу залишається непрогрітою. Це пояснюється низькою теплопровідністю термопластичного матеріалу, відсутністю перемішування та малим часом його перебування у зоні живлення.

4.6 Висновки до розділу 4

По завершенню даного розділу отримали наступне:

- 1) За допомогою програмного комплексу EDEM змодельовані кути природнього укусу для матеріалів різної форми та розраховані коефіцієнти внутрішнього тертя, порівняння їх з коефіцієнтом внутрішнього тертя реального матеріалу, проведено верифікацію програмного забезпечення;
- 2) Дослідили залежність коефіцієнту внутрішнього тертя від співвідношення довжини гранул до її діаметра, зі збільшенням цього співвідношення коефіцієнт внутрішнього тертя зростає;
- 3) Проведено числове моделювання, в результаті якого встановлено характер зміни тиску, температури і енергетичних витрат істотно залежить від

співвідношення коефіцієнтів тертя перероблюваного матеріалу по поверхні черв'яка і циліндра $f_{\text{ц}}$ та $f_{\text{ч}}$;

4) Дослідили, що при невеликих значеннях відношення коефіцієнтів тертя $f_{\text{ц}}$ та $f_{\text{ч}}$ тиск по довжині зони подачі зростає повільно і це зростання наближається до лінійного, а температура і енергетичні витрати відносно невисокі; при подальшому збільшенні співвідношення $f_{\text{ц}}$ та $f_{\text{ч}}$ зростання тиску відбувається експоненціально на відносно невеликій ділянці;

5) Дослідили, що збільшення співвідношення $f_{\text{ц}}$ та $f_{\text{ч}}$ призводить до підвищення енергетичних витрат і зростання температури поблизу поверхонь черв'яка і циліндра, тому для запобігання перегріву термопластичного матеріалу зону подачі необхідно охолоджувати;

6) Встановлено залежність масової продуктивності від збільшення частоти обертання черв'яка. Із отриманих кривих видно, що масова продуктивність зони живлення екструдера лінійно залежить від збільшення частоти обертання черв'яка, прямопропорційно збільшуючись при збільшенні частоти.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Загальні питання техніки безпеки

Для переробки пластмас використовується спеціальне обладнання. При неправильній експлуатації чи зношуванні цього обладнання, воно може стати небезпечним для здоров'я людини та є можливість виникнення надзвичайних ситуацій, наприклад пожежі. Пожежонебезпека пов'язана із можливістю займання пластмас і особливо порошкоподібних пластмас[29].

Згідно до теми магістерської дисертації «Моделювання процесу руху сипкого матеріалу в зоні живлення черв'ячного екструдера» необхідно розробити заходи щодо створення безпечних умов праці на черв'ячного екструдера, що застосовується при переробці полімерних матеріалів. При роботі на черв'ячному екструдері повинні виконуватися правила техніки безпеки, протипожежної техніки, а також норми виробничої санітарії.

При роботі працівник екструзійної лінії може піддаватися впливу різних шкідливих і небезпечних факторів таких, як:

- ураження електричним струмом;
- термічні опіки;
- пожежна безпека;
- освітленість робочого місця;
- повітря робочої зони.

5.2 Електронебезпека

Черв'ячний екструдер при роботі буде знаходитись в сухому приміщенні з нормальною температурою і вологістю повітря. Підлога приміщення залізобетонна, належить до приміщень з підвищеною безпекою.

На пульті керування оператора напруга $U = 220$ В, частота $f = 50$ Гц, для електродвигунів, що використовуються на лінії напруга $U = 380$ В, частота $f = 50$ Гц. Тип електромережі – із глухо заземленою нейтраллю.

Ураження електричним струмом можливе внаслідок таких ситуацій [29]:

- несправності нагрівачів, двигунів та іншого електрообладнання. Перевірку і ремонт електрообладнання повинні проводити тільки електромонтери.

- дотик до струмопровідних частин електроустановок, що безпосередньо перебувають під напругою або дотик до металевих конструктивних частин електроустановок, які не повинні знаходитися під напругою, але на яких внаслідок електричного пробоя чи природного старіння ізоляції з'явилась напруга;

- дотик до стін, підлог, будівельних конструкцій, які виявилися під кроковою напругою. Крокова напруга виникає при розтіканні електричного струму від трубопроводів, будівельних конструкцій, рейкових шляхів, на які перейшов електричний струм в результаті падіння проводів чи погіршення ізоляції.

До основних методів захисту від ураження електричним струмом при робочому режимі обладнання відносяться [29]:

- ізоляція струмопровідних частин електроустановок, а в особливих випадках подвійна чи посилена, що зменшую вірогідність попадань людини під напругу, замикань на землю і на корпус електроустановок, зменшує струм через людину при доторканні до неізольованих струмопровідних частин в електроустановках, що живляться від ізольованої від землі мережі;

- забезпечення неприступності струмоведучих частин, що перебувають під напругою, для випадкових дотиків, використання електромагнітних блокаторів безпеки у відкритих і закритих розподільчих пристроях;

- заземлення електрообладнання, розміщення гумових килимів або дерев'яних решіток перед машинами, використання індивідуальних захисних засобів, таких як діелектричні рукавиці і чоботи;
- маркування частин електрообладнання, проводів, забарвлення неізованих струмопровідних частин, ізоляції, внутрішніх поверхонь електричних шаф і щитів керування, попереджувальні сигнали, написи, таблички, комутаційні схеми, знаки високої електричної напруги, знаки попереджувальні тощо.

При аварійних ситуаціях, наприклад у випадку ушкодження чи пробою ізоляції струмопровідних частин – використовується занулення установки.

5.3 Термічні опіки

При екструзії температура розплавів полімеру може перебувати в діапазоні 100-250 °C [40]. Термічні опіки можуть мати місце:

- при дотиканні до нагрітих частин обладнання, таких як гарячі циліндри екструдерів, прес-форми, обігрівачі плити пресів і т. д. Нагріті частини машин, по можливості, повинні бути покриті теплоізоляцією, температура зовнішнього шару якої не повинна перевищувати 45 °C;
- при контакті з неохолодженими виробами. Тому тут бажано використовувати автоматизовані механізми і пристосування для переміщення виробів і (або) засоби захисту рук (рукавички, рукавиці);
- при відведенні пари і гарячих газів обладнання. Необхідно стежити за станом трубопроводів, манометрів, вентилів і засобів автоматики.

5.4 Повітря робочої зони

Сукупність параметрів повітря у виробничому приміщенні, які діють на людину у процесі праці, визначається температурою, вологістю і швидкістю

руху повітря, впливає на терморегуляцію організму робітника, а отже, і на продуктивність праці.

Необхідні умови мікроклімату витримуються пристроями вентиляції і розміщенням опалювальних приладів у приміщеннях цехів за санітарними нормами мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99.

При високій температурі полімери виділяють летючі газоподібні речовини, що впливають на органи дихання, центральну нервову систему і інші органи людини. Концентрація летких речовин і ступінь їх впливу на людину залежить від температури переробки, ефективності роботи витяжної вентиляції, часу впливу шкідливих парів на організм людини.

Нижче наведені типові виділення шкідливих газоподібних продуктів при переробці різних термопластів, їх вплив на людину, граничнодопустимі концентрації (ГДК) і деякі заходи щодо захисту від дії шкідливих речовин [40].

5.4.1 Поліетилен

Діапазон температур переробки екструзією для поліетилену високого тиску (ПЕВТ) складає 120...190 °С, для поліетилену низького тиску (ПЕНТ) – 160...250 °С.

При нагріву до 150 °С ПЕВТ виділяє кислоти, ефіри, неграничні вуглеводні, переокисні і карбонільні з'єднання, окис вуглецю, 1,2-бензпірен. В результаті контакту ПЕНТ з повітрям при 250 °С в газоповітряному середовищі виявляються СО, альдегіди (в тому числі формальдегід).

Вплив на організм людини. ПЕВТ (пил, витяжки) не роблять помітного впливу на організм. Деякі марки допускаються для контакту з харчовими продуктами. Вдихання парів продуктів термічного розкладання ПЕНТ веде до подразнення дихальних шляхів, при більш високих концентраціях – до порушення дихання. Перевірка на тварин показала наявність крововиливів і дистрофічних змін в нирках. Тривале вдихання пилу ПЕНТ (100 мг/м³) дає слабо виражене порушення функцій печінки.

ГДК в повітрі приміщення для суміші летючих продуктів термоокислювальної деструкції запропоновано унормувати за сумою альдегідів 5 мг/м³.

Заходами попередження є видалення летючих продуктів від місць їх утворення – загальна та місцева вентиляція.

5.4.2 Поліпропілен

Діапазон температур переробки поліпропілену (ПП) екструзією – 180...240 °С.

При дії кисню і високої температури ПП розкладається з утворенням органічних кислот, ефірів, ненасичених вуглеводнів, перекисних сполук, формальдегіду, ацетальдегіду, СО, СО₂.

Вплив на організм людини. Тривале вдихання пилу викликає лейкоцитоз і зміни в легенях. При вдиханні продуктів деструкції можуть спостерігатися подразнення кон'юнктиви очей і верхніх дихальних шляхів.

ГДК в повітрі приміщення. Для не стабілізованого ПП 10 мг/м³; для продуктів термодеструкції 5 мг/м³ (по альдегідам).

Заходи попередження аналогічні із попередніми – видалення летючих продуктів від місць їх утворення шляхом загальної та місцевої вентиляція.

5.4.3 Полівінілхлорид

Діапазон температур переробки полівінілхлориду (ПВХ) екструзією – 150...210 °С.

ПВХ виділяє хлористий вініл навіть при кімнатній температурі. Його вміст у сухій полімері 0,01-0,4 г/кг. При нагріванні вище 150 °С ПВХ частково розпадається з виділенням НС1 (до 33,65% при 100...160 °С). При термічній деструкції полімеру виділяється також оксид вуглецю СО.

Композиції, що містять пластифікатори, стабілізатори та інші добавки, можуть виділяти їх в повітря при приготуванні і переробці, наприклад, дибутилфталат (ДБФ), застосовуваний як пластифікатор для композицій ПВХ.

Вплив на організм людини. При вдиханні хлористого вінілу розвивається судинний невроз; при тривалому вдиханні і в великих кількостях розвивається вегето-судинна дистонія, яка веде до патологічних змін в кістках. При отруєнні свинцем, що виділяється з свинцевих стабілізаторів, з'являються запаморочення, головний біль, нудота, зниження апетиту.

При тривалій дії пластифікаторів (ДБФ) спостерігаються ознаки токсичного поліневриту. ДБФ, як і інші фталати, здатний викликати функціональні, а в подальшому і органічні зміни в центральній і периферичній нервовій системі. Володіючи помірними кумулятивними і слабкими дратівливими властивостями пари ДБФ при вдиханні викликають зниження збудливості вестибулярного і нюхового аналізаторів і шкірної чутливості, захворювання шлунково-кишкового тракту і верхніх дихальних шляхів.

Граничнодопустимі концентрації (ГДК) в повітрі приміщення. Пил полімеру – 6 мг/м³. ДБФ – 0,5 мг/м³.

При виділенні мономера, продуктів деструкції і пилу необхідна, в першу чергу, захист органів дихання, для чого служать витяжні пристрої, обмеження температур нагрівання полімеру. Для захисту від парів пластифікаторів, зокрема ДБФ, застосовується промисловий протигаз марки А та респіратор. Приміщення, де проводиться робота з ДБФ повинно бути обладнане витяжною вентиляцією і місцевими відсмоктувачами. Для захисту шкірних поверхонь застосовуються спецодяг, рукавички, захисні креми типу «біологічних рукавиць».

5.4.4 Полістирол і його співполімери

При температурі вище 200°C полістирол (ПС) і його сополімери, наприклад АБС-пластик, розкладаються з утворенням стиrolу і ін. низькомолекулярних сполук.

При нагріванні АБС пластика понад 250°C відбувається часткова деструкція з виділенням незначних кількостей парів стиролу, альфа-метилстірола, акрилонітрилу, ціаністого водню і окису вуглецю.

Токсична дія визначається кількістю стиролу. Викликає порушення функції вегетативної системи, астеничні реакції. При тривалому вдиханні шкідливих парів і тривалому контакті з їдкими продуктами (більше 10 років) можуть з'являтися хвороби шкіри (дерматити). Отруєння продуктами розпаду полістиролу проявляються в порушенні та зміні ритму дихання, подразненні очей і верхніх дихальних шляхів, судомах, в крові виявляється карбоксигемоглобін.

Пари метилстіролу, що виділяються при переробці АБС, викликають подразнення слизових оболонок очей і верхніх дихальних шляхів, порушення функцій центральної нервової системи і печінки, впливають на кровотворні органи. Пари нітрит акрилової кислоти надають подразнюючу дію на слизові оболонки очей і верхніх дихальних шляхів. Ціаністий водень може викликати задуху внаслідок паралічу органів дихання.

ГДК в повітрі приміщення: стирол – 5 мг/м^3 ; СО – 20 мг/м^3 . Пари нітрит акрилової кислоти – $0,5 \text{ мг/м}^3$; HCN – $0,3 \text{ мг/м}^3$; а-метил-стиролу – мг/м^3 .

Заходи попередження і індивідуальний захист. Захист від вдихання летючих з'єднань, що виділяються. Захист шкіри. Обов'язкові місцеві витяжні пристрої. При наявності в повітрі значних кількостей летючих речовин деструкції стирольних композицій, і серед них СО, HCN необхідне використання промислового фільтруючого протигаза марки БКФ. Видалення продуктів термічного розкладання в місцях їх утворення.

5.5 Освітленість робочого місця

Штучне освітлення поділяється в залежності від призначення на робоче, аварійне, евакуаційне та охоронне. Штучна освітленість на робочих місцях

нормується ДБН В.2.5-28-2006 "Природне і штучне освітлення" і не повинна бути меншою за 30 лк (лм/м²).

Норми освітленості витримуються установкою і правильним розміщенням у виробничому приміщенні достатньої кількості світильників. Головними джерелами світла для промислового освітлення є лампи розжарювання та газорозрядні лампи різноманітних типів[29].

5.6 Пожежна безпека

Згідно з ПУЕ та НАПББ 07.005-86 приміщення, де експлуатується установка по переробці полімерних виробів, відноситься до приміщень класу П-П-а, з наявністю:

- горючого пилу та волокна, НК ВП яких більше, ніж 65 г/м³;
- горючих рідини, температура запалення яких вище 61° С.

Основні причини виникнення пожежі у виробничих приміщеннях [29]:

- порушення технологічного режиму;
- несправність електрообладнання (коротке замикання, перевантаження);
- погана підготовка обладнання до ремонту;
- самозапалення промаслених матеріалів, витікання масла;
- недотримання графіків планово-попереджувального ремонту, зношення та корозія обладнання;
- несправність запірної арматури та відсутність заглушок на трубопроводах, які ремонтуються.

Основні заходи щодо забезпечення пожежної безпеки [29]:

- наявність пожежної сигналізації на основі автоматичних пожежних димових сигналізаторів;
- проведення інструктажів по пожежній безпеці з робочим персоналом.

- наявність ручного пожежного інвентарю (відра, ящики з піском, пожежні гідранти);
- дотримання протипожежних норм, правил при установці обладнання, опалення, вентиляції, електроосвітлення;
- своєчасний профілактичний ремонт, огляд та випробування технологічного обладнання;
- куріння в спеціально відведених для цього місцях.

Для гасіння невеликих вогнищ на початковій стадії застосовуються ручні вогнегасники таких марок:

- для гасіння електрообладнання – хладонові (ОАХ-0,5) або порошкові (ОП-5, ОП-10) вогнегасники у кількості трьох штук;
- для гасіння поліаміду – повітряно-пінні (ОВП-10), порошкові (ОП-5, ОП-10) вогнегасники, у кількості двох штук або вода.

Пожежні гідранти у приміщенні, де розташовується екструзійне обладнання, повинні розміщуватись на відстані 30 метрів один від одного з рукавами довжиною до 10 метрів. Відстань до пожежного виходу повинна бути не більш 40 метрів (рисунок 4.1), а їх кількість – не менш двох. Ширина прорізу двері евакуиходу – 2 метри. За СНиП 2.09.02–85 двері евакуиходу повинні відкриватись назовні.

Підходи до протипожежних щитків і їх конструкції повинні забезпечувати легкий доступ до інвентарю, проходи повинні бути завжди вільними.

5.7 Висновки до розділу 5

З огляду на зазначене можна стверджувати, що процес черв'ячної екструзії досліджуваних полімерних матеріалів відповідає вимогам охорони праці.

6 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

6.1 Опис ідеї проекту

У таблиці 6.1 і 6.2 ми проводимо аналіз змісту ідеї, можливих напрямків застосування, основних вигод, що може отримати користувач послуг, а також висвітлюємо особливості нашого проекту порівняно з конкурентами:

Таблиця 6.1 – Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Пропонується створити науково-дослідницьку лабораторію	1. Проводити дослідження по вимозі замовника	Економія ресурсів, покращення якості
	2. Проводити дослідження по трендовим напрямкам	Замовлення сучасних досліджень, у лабораторії, що володіє передовими знаннями

Таблиця 6.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Техніко-економічні характеристики ідеї</i>	<i>(потенційні) товари/концепції конкурентів</i>			<i>W (слабка ст-а)</i>	<i>N (нейтральна ст-а)</i>	<i>S (сильна ст-а)</i>
		<i>Мій проект</i>	<i>Науково-дослідницькі лабораторії</i>	<i>Внутрішні дослідницькі відділи підприємств</i>			
1	Ціна	+	—	+-			+
2	Якість	+	+	—		+	
3	Спектр пропонованих послуг	+	+	—		+	
4	Підтримка	+	+-	+		+	

Таким чином, наш проект є достатньо конкурентоспроможним, адже він має достатньо невисоку собівартість, тобто потребуватиме невеликі кошти для замовлення послуг, на відміну від утримання цілого дослідницького відділу чи оплати послуг зовнішніх науково-дослідницьких лабораторій, при цьому наш проект не поступатиметься фахівцям з інших науково-дослідницьких лабораторій.

6.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 6.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/додати?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 6.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
1.	створення науково-дослідницької лабораторії	Необхідно підібрати найкращі методи для проведення дослідів	Деякі технології існують, а деякі необхідно доробляти чи розробляти	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: технологія обирається індивідуально під кожне замовлення, обирається або вже існуюча технологія, або за необхідності розробляється нова				

6.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із

урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

У табл. 6.4 проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку:

Таблиця 6.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	8
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
3	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Нестабільна економіка
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необхідність затвердження авторського права
5	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	300

Виходячи зі стану ринку, є великий сенс заходити на ринок з стартапом, що дасть можливість замовникам досліджувати важливі показники для економії ресурсів.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до послуг для кожної групи (табл. 6.5).

Таблиця 6.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до послуг</i>
1	Економія ресурсів	Підприємства хімічного машинобудування	Замовлення суттєво різних типів досліджень	Висока якість дослідів, технічна підтримка проекту, невисока вартість, швидкість виконання
		Підприємства полімерних та силікатних виробів		

Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища: у табл. 6.6 подані фактори, що сприяють ринковому впровадженню проекту, а у табл. 6.7 – фактори, що йому перешкоджають.

Таблиця 6.6 – Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Політична ситуація в країні	Страх інших країн співпрацювати	Створити подібну компанію в іншій країні
2	Інфляція	Неплатоспроможність замовників	Працювати із замовниками, на яких інфляція не впливає, з іншими країнами
3	Нові технології	Відмова від традиційних матеріалів, втрата замовників	Можливість знайти нових замовників, робота з новими матеріалами, вийти на ринок першими
4	Низька кваліфікація трудових ресурсів	Нестача кваліфікованих робітників	Підвищення кваліфікації, навчання

Таблиця 6.7 – Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Зацікавленість споживачів	Підприємства зацікавлені у дослідженнях	Продаж досліджень
2	Збільшення кількості полімерних виробництв	Останнім часом в Україні будуються нові підприємства полімерних виробів	Продаж досліджень

У табл. 6.8 проведено аналіз пропозиції: загальні риси конкуренції на ринку:

Таблиця 6.8 – Степеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Вказати тип конкуренції - монополістична	Монополістична	Покращення якості досліджень, Постійне оновлення, додаткові можливості для клієнта, Технічна підтримка цілодобово, Низька вартість досліджень
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/національний/...	Національний/міжнародний	
3. За галузевою ознакою - міжгалузева/ внутрішньогалузева	Міжгалузева	
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	Між бажаннями	
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	Цінова	
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	Не марочна	

Більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера) подано у наступній таблиці (табл. 6.9):

Таблиця 6.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Клієнти</i>
	<i>Науково-дослідницькі лабораторії</i>	<i>Внутрішні дослідницькі відділи підприємств</i>	<i>Потреба у високій користі дослідження та не високій ціні</i>
Висновки:	Немає великих перешкод для виходу на ринок	Є ризик відмови від послуг на користь внутрішнього відділу	Складність у проведенні високо корисних досліджень

На основі попередніх таблиць ми визначили, що основним конкурентом є науково-дослідницькі лабораторії, або ж внутрішні дослідницькі відділи фірм. Основним їх недоліком є велика вартість замовлення послуг або утримання відповідно. Це дає нам змогу вийти на ринок, так як основною перевагою наших послуг є низька вартість.

У табл. 6.10 обґрунтовано перелік факторів конкурентоспроможності, що базується на аналізі, поданому у попередніх таблицях:

Таблиця 6.10– Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>№ п/п</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Невисока вартість послуг	Це має бути впливовим фактором відмовитись, або зменшити внутрішній відділ, та користуватися нашими послугами
2	Якість	Послуги нічим не поступаються вже існуючим
3	Спектр пропонованих послуг	Широкий спектр пропонованих дослідів
4	Підтримка	Можливість підтримки та консультації для реалізації результатів досліджень

Нижче (табл. 6.11) проведено аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту:

Таблиця 6.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ n/ n	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-10	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ціна				+				
2	Достовірність результатів						+		
3	Швидкість виконання						+		
4	Кваліфікація робітників					+			
5	Презентація результатів					+			
6	Спектр пропонованих послуг			+					
7	Система знижок				+				
8	Підтримка проекту				+				

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, можливостей (Opportunities) та загроз (Troubles) (табл. 6.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 6.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складено на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 6.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Ціна Спектр пропонованих послуг Система знижок Підтримка проекту	Слабкі сторони: Швидкість виконання Достовірність результатів через брак досвіду
Можливості: Підприємства зацікавлені у скороченні дослідницького штату. Останнім часом в Україні відкриваються нові підприємства, тих галузей, в яких ми маємо кваліфікацію	Загрози: Існує загроза, що через брак досвіду та взаємодії підприємств з існуючими науково-дослідницькими лабораторіями, буде важко знайти замовників

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи проаналізовано з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 6.13).

Таблиця 6.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Орієнтація на іноземні підприємства	Середня	6 місяця
2	Орієнтація на підприємства інших галузей	Середня	12 місяці

Виходячи з ймовірності отримання ресурсів та строків реалізації, за умови, що впровадження послуг на території України буде невдалим, ми змінимо орієнтацію на іноземні підприємства, де підприємці більш схильні до інвестування у дослідження, нововведення та модернізації.

6.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 6.14):

Таблиця 6.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенці- йних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнто- вний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсив- ність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Українські виробники у галузі хімічного машинобудування	Висока. Якщо показати, наскільки це вигідно, вони сприймуть послуги	Високий	Невелика кількість прямих конкурентів	Якщо споживачі сприймуть послуги, то легко зайти на ринок
2	Іноземні виробники у галузі хімічного машинобудування	Висока	Високий	Невелика кількість прямих конкурентів, але більша ніж на українському ринку	Увійти на іноземний ринок важче через вищу конкуренцію
Які цільові групи обрано: Українські і іноземні компанії, що працюють у галузі хімічного машинобудування, адже вони займають великий сегмент на виробничому ринку					

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 6.15):

Таблиця 6.15 – Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ n/ n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспромо- жні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>
1	Просувати свій стартап в українські і іноземні компанії	Переконувати керівників підприємств, що проведені нами дослідження досить швидко окупляться і будуть економити ресурси	Низька собівартість продукту, широкий спектр досліджень	Стратегія спеціалізації

Наступним кроком став вибір стратегії конкурентної поведінки (табл.6.16):

Таблиця 6.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки</i>
1	Ні, вже є подібні проекти, але їх не велика кількість	Компанія буде шукати нових замовників, співпрацювати із молодими, новими компаніями, а також забирати існуючих у конкурентів	Частково буде копіювати, але позиціонувати себе, як дослідницький центр найновітніших розробок	Стратегія виклику лідера (атакування лідера найкращим співвідношенням «ціна-якість»).

На основі вимоги споживачів з обраних сегментів до стартап-компанії (табл. 6.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 6.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 6.16) розроблено стратегію позиціонування (табл. 6.17), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 6.17 – Визначення стратегії позиціонування

<i>№ п/ п</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова страте- гія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспр- оможні позиції власного стартап- проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1	Висока корисність дослідів Технічна підтримка Невисока ціна	Стратегія спеціалі- зації	Низька собівартість продукту	Низька ціна, підтримка проекту, допомога у впровадженні дослідів

Таким чином, шляхом переконання керівників підприємств, що за низької вартості є можливість отримувати дослідження, які наша компанія допоможе впровадити у підприємство та буде підтримувати її працездатність на гарантійний період, що зекономлять їх ресурси.

6.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

У табл. 6.18 ми підсумували результати попереднього аналізу конкурентоспроможності послуг, щоб сформувати маркетингову концепцію послуг, які отримає споживач:

Таблиця 6.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційних послуг

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує послуга</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Висока корисність дослідів	Економія ресурсів, швидка окупність дослідів	З використанням даних послуг зменшується витрати ресурсів, підвищується якість продукції
2	Невелика ціна	Низька вартість послуг	Низька вартість, порівняно з утриманням цілого дослідницького відділу
3	Технічна підтримка	Допомога при виникненні проблем	Не потрібні висококваліфіковані спеціалісти для технічної підтримки

Надалі ми розробили трирівневу маркетингову модель послуг: уточнили ідею послуг, її фізичні складові, особливості процесу їх надання (табл. 6.19).

Таблиця 6.19 – Опис трьох рівнів моделі послуг

<i>Рівні послуг</i>	<i>Сутність та складові</i>
I. Послуга за задумом	Науково-дослідницька лабораторія для здійснення високо корисних дослідів зі швидкою окупністю
II. Послуга у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	1. Невелика ціна
	2. Технічне обслуговування
III. Послуга із підкріпленням	Якість: висока якість досліджень
	Досліди, які можна замовити на сайті
	До продажу: широкий спектр досліджень
Після продажу: підтримка при впровадженні досліджень та протягом гарантійного терміну	
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: захист дослідницьких установок патентами, а результати досліджень захищені авторськими правами	

Наступним кроком стало визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційні послуги (остаточне визначення

ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на послуги-аналоги або послуги субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 6.20). Аналіз проведено експертним методом.

Таблиця 6.20 – Визначення меж встановлення ціни

<i>№ n/n</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари- аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1	Регулюються заробітною платою робітників дослідницьких відділів підприємств	Варіюються в залежності від складності досліджу	Більше 1 млрд грн/рік	Приблизно від \$100 за нескладне дослідження, за дослідження, що не потребують значних витрат часу

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 6.21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 6.21– Формування системи збуту

<i>№ n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Купівля окремих досліджень для різних замовників	Постачальник товару – офіційний сайт, на якому можна замовити дослідження. – публікації – конференції	Канал нульового рівня	Офіційний сайт

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 6.22):

Таблиця 6.22 – Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/ п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користують ся цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонуван ня</i>	<i>Завдання рекламного повідомлен ня</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1	Необхідно дати зрозуміти потенційному клієнту, на скільки вигідно користуватись нашими послугами	Інтернет, e-mail, телефон, конференції	Публікації у наукових та технічних журналах, email-маркетинг, виступи на конференції	Привернути увагу, показати результати, яких ми досягли для наших клієнтів.	Надання результатів яких досягли наші клієнти, велика кількість публікацій у спеціалізованих виданнях.

6.6 Висновки до розділу 6

Провівши комплексний аналіз впровадження стартапу, визначивши його технологічні особливості, переваги та недоліки, на основі яких було визначено його конкурентоспроможність, ми можемо з впевненістю сказати, що сенс впроваджувати проект такого типу є. Адже наші дослідження мають високу ефективність, швидку окупність і при цьому має ідеальне співвідношення «ціна-якість».

Шляхом дослідження конкурентів ми визначили, що ринок не насичений подібного роду послугами, дослідження можуть робити або внутрішні відділи, склад якого налічує десятки людей, або незалежні дослідницькі компанії, послуги яких коштують великих грошей. Наші послуги є дешевше, що є їх основною перевагою перед переліченими вище конкурентами.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання магістерської дисертації були отримані наступні результати:

1. Після проведення літературного огляду стану питання була доведена доцільність дослідження залежностей коефіцієнту тертя та коефіцієнту бокового тиску сипкого полімерного матеріалу від комплексного впливу швидкості тертя, тиску, температури та висоти шару гранул;

2. На підставі літературного огляду було створено експериментальну установку для визначення величини коефіцієнта тертя та коефіцієнту бокового тиску сипкого матеріалу, установка захищена патентами України на корисні моделі № 132798 та № 133176.

3. Експериментально встановлено залежності тертя гранульованого полімерного матеріалу по металевій поверхні робочих органів екструдера, а також коефіцієнту бокового тиску від тиску, температури, швидкості та висоти шару гранул для полістиролу, ПВГ, ПВХ та севілену.

Для полістиролу залежність коефіцієнту тертя: від тиску є спадаючою; залежність від швидкості тертя є спадаючою; залежність від температури є зростаючою; залежність від висоти шару гранул – відсутня.

Для ПВГ залежність коефіцієнту тертя: від тиску є спадаючою; від швидкості тертя на відміну від полістиролу є зростаючою; від температури зростаючою; від висоти шару гранул не залежить.

Для севілену залежність коефіцієнту тертя: від тиску є спадаючою; від швидкості – зростаючою; від температури – зростаючою; від висоти шару гранул при певних значеннях тиску – спадаючою;

Для ПВХ залежність коефіцієнту тертя: від тиску є спадаючою; від швидкості є зростаючою; від температури – зростаючою; від висоти шару гранул спадаючою.

4. Експериментально встановлено залежності коефіцієнтів бокового тиску для чотирьох полімерів. Залежності у загальному випадку схожі для усіх

досліджуваних матеріалів, а саме у випадку при підвищенні температури коефіцієнт бокового тиску зростає, при підвищенні швидкості – спадає, при підвищенні тиску та висоти шару гранул – також спадає.

5. Встановлено залежність коефіцієнту внутрішнього тертя від співвідношення довжини гранули до її діаметру, встановлено, що зі збільшенням цього співвідношення коефіцієнт внутрішнього тертя зростає.

6. Встановлено залежність масової продуктивності при заданих коефіцієнтах тертя від збільшення частоти обертання черв'яка. Встановлено, що масова продуктивність зони живлення екструдера лінійно залежить від збільшення частоти обертання черв'яка, прямопропорційно збільшуючись при збільшенні частоти.

7. За результатами проведених досліджень опубліковано статтю у науковому фаховому виданні України та отримано два патенти України на корисні моделі. Апробацію отриманих результатів було здійснено на чотирьох науково-технічних конференціях.

8. Дисертація виконана відповідно до плану науково-дослідної роботи кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування і відповідає напрямку наукових досліджень Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. All about QBasic and QuickBasic [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.qbasic.net> – Дата доступу : 10.05.19. – Назва з екрану.
2. Audrius Zunda, Wear Resistance of Industrial Polymers Under Lubrication with Oils / Audrius Zunda, Juozas Padgurskas, Vytenis Jankauskas, Raimondas Levinskas, Rimantas Kreivaitis // Scientific Journal of Riga Technical University – 2010 – Vol. 21 – 21–25 p.
3. EDEM is the market-leading software for bulk material simulation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.edemsimulation.com/software/> – Дата доступу : 10.05.19. – Назва з екрану.
4. Granular packings: Nonlinear elasticity, sound propagation, and collective relaxation dynamics / H. A. Makse, N. Gland, D. L. Johnson, L. Schwartz // Physical Review E. 2004, Vol. 70. P. 061302. doi.org/10.1103/PhysRevE.70.061302
5. Hassanpour and M. Pasha, “Discrete element method applications in process engineering,” in Introduction to Software for Chemical Engineers, M. M. Martin, Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
6. Karvatskii A. Ya., Lazarev T. V. Evaluation of the Discrete Element Method for Predicting the Behavior of Granular Media Using Petroleum Coke as an Example // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 50, Issue 3–4. P. 186–192. doi: 10.1007/s10556-014-9877-y
7. Kremmer, “A discrete element method for industrial granular flow applications,” Ph.D. dissertation, Dept. Agricultural & Environmental Science, Newcastle Univ., Newcastle upon Tyne, UK, 2001.
8. L. Zsidai, Tribology research of engineering polymers in different systems / L. Zsidai, P. Zsendro – Hungary, Godolo 2005 – 8–11 p.
9. M.A. Chowdhury, Experimental Investigation of Friction Coefficient and Wear Rate of Composite Materials Sliding Against Smooth and Rough Mild Steel

Counterfaces / M.A. Chowdhury, D.M. Nuruzzaman, B.K. Roy, S.Samad, R.Sarker A.H.M. Rezwan // Tribology in Industry – 2013 – Vol. 35, №. 4 – 286 – 295 p.

10. Pöschel T., Schwager T. Computational granular dynamics models and algorithms. Berlin: Springer, 2005. 322 p.

11. Rao K. K., Nott P. R. An Introduction to Granular Flow. New York: Publ. in the USA by Cambridge University Press, 2008. 490 p.

12. Rauwendaal, C. Understanding extrusion / C. Rauwendaal. – Munich: Hanser Publishers, 2010. – 231 p.

13. Арзамасцев С. В. Полный факторный эксперимент: «Моделирование и оптимизация технологии полимерных материалов». – Саратов, 2009.

14. Белый В.А., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение и износ материалов на основе полимеров : монографія /– Минск : Наука и техника, 1976. – 432 с.

15. Бойцов Ю.А. Исследование внутреннего и внешнего трения сыпучих грузов: Метод. указания к лабораторной работе для студентов спец. 170600. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. – 10 с.

16. Влияние скорости скольжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://chem21.info/page/201130109194099241007228229097116013131177182059/> – Дата доступа : 10.05.19. – Назва з екрану.

17. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин : метод. реком. – Л. : Наука, 1985. – 112 с.

18. Заявка u201809947 UA, МПК G01N 19/02 (2018.01). Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипкого матеріалу / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський; заявник Нац. техніч. ун-т України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – заявл 05.10.2018; рішення про видачу від 14.01.2019.

19. Заявка u201810492 UA, МПК G01N 19/02 (2018.01). Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипкого матеріалу/ І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський; заявник Нац. техніч. ун-т України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – заявл 24.10.2018; рішення про видачу від 23.01.2019.

20. Ивченко Г. И., Медведев Ю. И. Введение в математическую статистику. — М. : Издательство ЛКИ, 2010
21. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. — 2-е изд. — М., 1962.
22. Лукашова В. В, Мікульонок І. О., Радченко Л. Б. Екструзія пінополімерів: монографія /. — К. : НТУУ «КПІ», 2011. — 175 с.
23. Ляпушкин С. В. Повышение эффективности управления электроприводом автоматизированного комплекса дозирования сыпучих материалов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03. — Томск, 2015. — 146 с.
24. Метод наименьших квадратов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cleverstudents.ru/articles/mnk.html> — Дата доступа : 06.05.19. — Назва з екрану.
25. Микулёнок И. О., Радченко Л. Б. Червячная экструзия термопластичных материалов. Часть 1. Обобщённая модель червячной экструзии // Химическая промышленность. 2011. Т. 88.
26. Микулёнок И. О. Оборудование и процессы переработки термопластичных материалов с использованием вторичного сырья [на укр. языке]. К.: Изд-во «Политехника», 2009. 265 с.
27. Мікульонок І. О. , Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Радченко Л. Б. Основи проектування одночерв'ячних екструдерів : навч. посіб. /. — К. : НТУУ «КПІ», 2015. — 200 с.
28. Описание и технологии переработки – Экструзия [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.polymerbranch.com/termoplast/view/5.html> — Дата доступа : 08.08.18. — Назва з екрану.
29. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. / За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.
30. Пат. № 107473 U Україна, МПК G01N 19/02 (2006.01). Установка для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя кускового або сипучого

матеріалу / Сокольський О.Л., Мікульонок І.О., Швачко Д.Г., Витвицький В.М.; заявник і патентовласник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – № u201511736; заявл. 27.11.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 11, 2016.

31. Пат. № 59650 U Україна, МПК G01L 1/00 (2011.01). Спосіб визначення динамічного коефіцієнта тертя/ Ю.А. Костандов; заявник і патентовласник Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського. – № u201013094; заявл. 04.11.2010; опубл. 25.05.2011, Бюл. № 10, 2011.

32. Погрешности измерений [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.iatephysics.narod.ru/knowhow/knowhow7.htm> – Дата доступу : 05.03.19. – Назва з екрану.

33. Радченко Л. Б., Сивецкий В. И. Основы моделирования и конструирования червячных экструдеров [на укр. языке]. К.: Изд-во «Політехніка», 2002. 152 с.

34. Розроблення стартап-проекту: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

35. Скульский О. И. Численное моделирование одночервячных экструдеров / О. И. Скульский // Пластические массы. — 1997. — № 8. — С. 39—44.

36. Спиваковский А. О. Транспортирующие машины: учеб. пособие для машиностроительных вузов, 3-е изд., перераб. / А. О. Спиваковский, В. К. Дьячков. – Москва: Машиностроение, 1983. – 487с.

37. Струтинский В. Б., Радионенко А. В., Ищенко Е. А. Триботехнические исследования полимерных композитов, применяемых при восстановлении направляющих станков //Проблеми тертя та зношування. – 2015. – №2 – С. 4-8.

38. Татарников А. А. Влияние расхода утечки на процесс переработки резиновой смеси в напорной зоне червячной машины / А. А. Татарников, Л. В. Буртелов, Д. Б. Горбунов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2005. — № 4. — С. 7—9.

39. Татарников А. А. Обобщенная математическая модель производительности напорной зоны червяка / А. А. Татарников, Л. В. Буртелов // Пластические массы. — 2004. — № 4. — С. 50—52.

40. Техника безопасности при переработке термопластичных древесно-полимерных композиционных материалов [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.dpk-deck.ru/page/tech-bezopasnosti.html> — Дата доступа : 11.09.18. — Назва з екрану.

41. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник / пер с англ. В. В. Яковлева и В. И. Колядина. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.

42. Фридман М. Л. Математическое моделирование одношнековых экструзионных машин : [обзор. информ.] / М. Л. Фридман, С. Н. Михайлов, Д. М. Мухаметгалеев. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1988. — 33 с. — (Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ДОСЯГНЕННЯ

ДОДАТОК А1

Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л., Бардашевський С.В. Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипкого матеріалу // Сучасні технології у промисловому виробництві : V Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф., (Суми, 17-20 квітня 2018 р.) : матер. та прог. Суми : СумДУ, 2018. С. 242–243.

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ КОЕФІЦІЄНТА ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ

*Витвицький В. М., аспірант; Мікульонок І. О., професор;
Сокольський О. Л., доцент; Бардашевський С. В., магістрант,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ*

Процес екструзії полімерних матеріалів є об'єктом багатьох досліджень, які описані в багатьох працях. Така актуальність пов'язана зі стабільним попитом на вироби із полімерних матеріалів і композицій на їх основі: значна частина полімерів піддається процесу екструзії принаймні один раз під час його одержання в реакторі полімеризації до кінцевого виробу або напівфабрикату.

Точність проектування обладнання для переробки полімерної сировини значною мірою залежить від точності врахування коефіцієнта зовнішнього тертя та коефіцієнта бокового тиску сипкого матеріалу [1]. Однак, в існуючих дослідженнях коефіцієнт зовнішнього тертя зазвичай визначаються для монолітних зразків, нехтуючи взаємодією між окремими частинками полімеру, а дослідження коефіцієнта бокового тиску проведені для обмеженого класу матеріалів, тому цих даних недостатньо для отримання загальної картини їх поведінки при переробці.

З вищезазначеного випливає необхідність проведення додаткових досліджень фізико-механічних властивостей для різних типів гранульованих полімерних матеріалів.

Авторами розроблено конструкцію установки, що може бути використана для дослідження фізико-механічних властивостей кускових або сипких матеріалів, зокрема для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя цих матеріалів по різних поверхнях, та коефіцієнта бічного тиску, у тому числі й залежно від температури й навантаження [2]. На рис. 1 зображено схему установки.

У пристрої для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипкого матеріалу 1, що містить споряджений нагрівниками 2 горизонтальний ротор 3, встановлений над ним вертикальний порожнистий корпус 4 для сипкого матеріалу 1 зі встановлюваним у ньому штовхачем 5, що взаємодіє з регулятором вертикальної сили 6, а також засіб вимірювання горизонтальної сили 11, що діє на порожнистий корпус 4 перпендикулярно осі 12 ротора 3, порожнистий корпус 4 споряджено засобом вимірювання горизонтальної сили 13, що діє на порожнистий корпус 4 вздовж осі 12 ротора 3. Регулятор вертикальної сили 6 виконано у вигляді шарнірно закріпленого на стояку 7 важеля 8 з одним плечем для взаємодії зі штоком 9 і з другим для закріплення на ньому противаги 10.

Спорядження порожнистого корпуса засобом вимірювання горизонтальної сили, яка діє на порожнистий корпус вздовж осі ротора, дає

ДОДАТОК А2

Дослідження триботехнічних властивостей гранульованих полімерних матеріалів / В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський, О. Л. Сокольський, І. О. Мікульонок // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки. – Київ: Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського. – 2018. – № 5 (29). – С.9-13.

Галузеве машинобудування

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 531.46-036.5-026.772

Витвицький В.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бардашевський С.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мікульонок І.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сокольський О.Л.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРАНУЛЬОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто наявні конструкції установок різних типів для дослідження триботехнічних властивостей гранульованих полімерних матеріалів. Описано дві вдосконалені конструкції установок, розроблені авторами. Вдосконалені конструкції установок розширюють їх функціональні можливості. Описані результати досліджень на одній із установок. Дослідження проведено для декількох типів полімерних матеріалів.

Ключові слова: полімер, гранула, екструдер, тертя, температура, тиск.

Постановка проблеми. Дослідження процесу екструзії полімерних матеріалів є актуальним завданням, оскільки на виробі з полімерних матеріалів і композицій на їх основі є стабільний попит: значна частина полімерів піддається процесу екструзії принаймні один раз під час їх одержання в реакторі полімеризації до кінцевого виробу чи напівфабрикату. Точність проектування обладнання для перероблення полімерної сировини значною мірою залежить від точності врахування коефіцієнта зовнішнього тертя та коефіцієнта бокового тиску сипкого матеріалу [1–4]. Для визначення цих величин проводять натурні експерименти, під час яких використовують певні спрощені моделі руху матеріалу в черв'ячному каналі екструдера, однак у наявних дослідженнях коефіцієнт зовнішнього тертя зазвичай визначається для монолітних зразків, при цьому нехтується взаємодія між окремими частинками полімеру, а дослідження коефіцієнта бокового тиску проведені для обмеженого класу матеріалів, тому цих

відомостей недостатньо для отримання загальної картини їх поведінки під час перероблення.

Із вищезазначеного випливає необхідність проведення додаткових досліджень триботехнічних властивостей для різних типів гранульованих полімерних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час аналізу наявних публікацій була виявлена відсутність єдиної методики для експериментального визначення зазначених коефіцієнтів зовнішнього тертя й бокового тиску, а також неможливість проведення на більшості установок досліджень саме для гранульованих полімерних матеріалів.

Б. Струтинський, А. Радіоненко, Є. Іщенко [5] пропонують визначати коефіцієнт тертя на установці, схема роботи якої зображена на рис. 1. Установа дозволяє контролювати момент тертя, сумарний лінійний знос зразка та контрзразка й температуру в зоні тертя. У корпусі установки 1 полімерний вкладиш 2 установлюється між зразком 3 та металевою стрічкою 4, якою контролюють зусилля притискання.

ДОДАТОК АЗ

Витвицький В. М., Бардашевський С.В., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Конструктивні особливості пристроїв для проведення експериментальних досліджень триботехнічних властивостей сипких матеріалів // Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки : VIII Всеукр. наук.-практ. конф., (Київ, 13-14 грудня 2018 р.) : збір. доп. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 18-20.

VIII Всеукраїнська конференція «Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки»
УДК 531.46-036.5-026.772

Конструктивні особливості пристроїв для проведення експериментальних досліджень триботехнічних властивостей сипких матеріалів

Витвицький В.М., аспірант; Бардашевський С.В., магістрант; Мікульонок І.О., проф., д.т.н.;
Сокольський О.Л., доц., к.т.н.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Наведено огляд існуючих і розроблених авторами конструкцій установок для проведення експериментальних досліджень триботехнічних властивостей сипких матеріалів.

Дослідження процесу екструзії полімерних матеріалів є актуальним завданням, оскільки на виробі із полімерних матеріалів і композицій на їх основі є стабільний попит: значна частина полімерів піддається процесу екструзії принаймні один раз під час його одержання в реакторі полімеризації до кінцевого виробу або напівфабрикату. Точність проектування обладнання для переробки полімерної сировини значною мірою залежить від точності врахування коефіцієнта зовнішнього тертя та коефіцієнта бокового тиску сипкого матеріалу [1].

Аналіз існуючих публікацій виявив неможливість проведення на більшості існуючих пристроїв досліджень саме для сипких матеріалів, оскільки в існуючих конструкціях установок коефіцієнт зовнішнього тертя зазвичай визначається для монолітних зразків, нехтуючи взаємодією між окремими частинками матеріалу, а також відсутність єдиної методики для експериментального визначення зазначених коефіцієнтів зовнішнього тертя і бокового тиску. З вищезазначеного випливає необхідність створення нових установок, завдяки яким буде можливим проведення досліджень триботехнічних властивостей для різних типів сипких матеріалів, зокрема для гранульованих полімерних матеріалів.

Автори [2] пропонують визначати коефіцієнт тертя на установці, схема роботи якої зображена на рис. 1. Установка дозволяє контролювати момент тертя, сумарний лінійний знос зразка та контрзразка і температуру в зоні тертя. В корпусі установки 1 полімерний вкладиш 2 встановлюється між зразком 3 та металевою стрічкою 4, якою контролюють зусилля притискання. Недоліком даної конструкції є неможливість використовувати для досліджень гранульований полімерний матеріал.

У роботі [3] пропонується визначати коефіцієнт тертя за допомогою установки (рис. 2), встановлюючи зразок 1, з одного матеріалу, виготовлений у вигляді паралелепіпеда, між зразками 2, виготовлених з іншого матеріалу, через пружний елемент 3, що оснащений тензOMETричним мостом. Зразки 2 здійснюють одновісне стискування силою N до значення N_0 , за допомогою гвинта 4, що жорстко закріплений в опорі 5 відносно зразка 2. Через пружний елемент 6 із тензOMETричним мостом діють на зразок 1 навантаженням F , яке перпендикулярне силі N і пропорційне деформації δ елемента 6. Реєструючий пристрій 7 приймає сигнали від тензOMETричних мостів елементів 3 і 6. При цьому результат реєстрації величин $F(t)$, $N(t)$ та $\delta(t)$, що змінюються в часі, відображається на моніторі комп'ютера у реальному часі у вигляді графіків.

Зсувне навантаження $F(t)$ змінюють обертанням гвинта 4, до значення $F_c(t_c)$, при якому зразок 1 зсувається відносно зразків 2. Після чого коефіцієнт тертя встановлюють по залежності:

$$k = \frac{F_i(t_i)}{2N_i(t_i)} \quad (1)$$

Недоліком методу є неможливість визначення залежності коефіцієнту тертя від температури, а також відсутність можливості використовувати зразки у вигляді гранул.

ДОДАТОК А4

Витвицький В. М., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л., Бардашевський С.В. Установка для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипучого матеріалу // Ефективні процеси та обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки : VI Всеукр. наук.-практ. конф., (Київ, 14-15 грудня 2017 р.) : збір. доп. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 34-35.

УДК 678.057.3

Установка для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипучого матеріалу

Витвицький В.М., аспірант; Мікульонок І.О., проф., д.т.н.; Сокольський О.Л., доц., к.т.н.,
Бардашевський С.В., студент

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Розроблено установку для дослідження фізико-механічних властивостей кускових або сипучих матеріалів, зокрема для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя цих матеріалів по різних поверхнях, у тому числі й залежно від температури й навантаження. Установка дає змогу визначати коефіцієнт зовнішнього тертя як монолітного, так і сипкого матеріалу залежно від тиску й температури, в тому числі забезпечує визначення бокового тиску.

Відомі установки для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипучого матеріалу, що містять споряджений нагрівниками горизонтальний ротор, встановлений над ним вертикальний порожнистий корпус для сипучого матеріалу зі встановлюваним у ньому штовхачем, що взаємодіє з регулятором вертикальної сили, а також засіб вимірювання горизонтальної сили, що діє на порожнистий корпус перпендикулярно осі ротора [1]. Їх недоліком є те, що вони не забезпечують визначення бокового тиску сипучого матеріалу, що вкрай важливо для аналізу процесу поведінки сипучого матеріалу в технологічному й допоміжному обладнанні, зокрема в черв'ячних екструдерах для перероблення полімерних матеріалів.

Розроблено конструктивну схему установки, яка забезпечує визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя матеріалів по різних поверхнях, у тому числі й залежно від температури й навантаження, а також визначення бокового тиску.

Установка для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипучого матеріалу 1 (рис. 1) містить споряджений нагрівниками 2 горизонтальний ротор 3, встановлений над ним вертикальний порожнистий корпус 4 для сипучого матеріалу 1 зі встановлюваним у ньому штовхачем 5, що взаємодіє з регулятором вертикальної сили 6, виконаним у вигляді шарнірно закріпленого на стояку 7 важеля 8 з одним плечем для взаємодії зі штоком 9 і з другим для закріплення на ньому противаги 10. Також установку споряджено засобом вимірювання горизонтальної сили 11, що діє на порожнистий корпус перпендикулярно осі 12 ротора 3, а порожнистий корпус – засобом вимірювання горизонтальної сили 13, що діє на порожнистий корпус вздовж осі 12 ротора 3.

Установка працює таким чином.

Залежно від потрібних умов проведення досліджень (температура, тиск) за допомогою нагрівників 2, а також противаги 10 та її плеча на важелі 8 забезпечують відповідно потрібні значення температури ротора 3 і зусилля на штовхачі 5, що діє на зразок сипучого матеріалу 1. Після початку обертання ротора 3 з певною швидкістю засобами 11 і 13 вимірювання горизонтальних сил у взаємноперпендикулярних напрямках, що дає змогу визначити як коефіцієнт зовнішнього тертя сипучого матеріалу 1 по матеріалу ротора 3, так і коефіцієнт бокового тиску.

ДОДАТОК А5

Витвицький В. М., Бардашевський С.В., Мікульонок І. О., Сокольський О. Л. Експериментальні дослідження триботехнічних властивостей гранульованих полімерних матеріалів // Aktuelle Themen im Kontext der Entwicklung der modernen Wissenschaften : збір. наук. праць «ЛОГОС» до мат. міжн. наук.-практ. конф., (Німеччина, Дрезден, 23 січня 2019) : тези доп. Дрезден: Громадська організація «Європейська наукова платформа», 2019. Т. 5. С. 58-60.

58 • Aktuelle Themen im Kontext der Entwicklung der modernen Wissenschaften • Band 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРАНУЛЬОВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Науково-дослідна група:
аспірант Витвицький Віктор Миронович
магістрант Бардашевський Сергій Валерійович
д-р. т. наук, професор Мікульонок Ігор Олегович
канд. т. наук, доцент Сокольський Олександр Леонідович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Україна

Дослідження процесу екструзії полімерних матеріалів є актуальним завданням, оскільки існує стабільний попит на вироби з полімерів та композицій на основі полімерних матеріалів: значна частина полімерів піддається процесу екструзії хоча б один раз від часу його одержання в реакторі полімеризації до отримання кінцевого виробу або напівфабрикату. Точність проектування обладнання для переробки полімерної сировини значною мірою залежить від точності врахування коефіцієнта зовнішнього тертя та коефіцієнта бічного тиску сипкого матеріалу [1-3].

Для визначення цих величин проводять натурні експерименти, під час яких використовують певні спрощені моделі руху матеріалу у черв'ячному каналі екструдера, однак, в існуючих дослідженнях триботехнічних властивостей полімерних матеріалів коефіцієнт зовнішнього тертя зазвичай визначається для монолітних зразків, а дослідження коефіцієнта бічного тиску проведені для обмеженого класу матеріалів, тому цих даних недостатньо для отримання загальної картини їх поведінки в процесі переробки.

Під час аналізу існуючих публікацій [4] було виявлено відсутність єдиної методики для експериментального визначення зазначених коефіцієнтів, а також неможливість проведення на більшості існуючих установок досліджень для гранульованих полімерів, оскільки в існуючих конструкціях установок коефіцієнт зовнішнього тертя зазвичай визначається для монолітних зразків, нехтуючи взаємодією між окремими частинками матеріалу.

Враховуючи вищезазначене, наявна необхідність у створенні нових установок для проведення досліджень триботехнічних властивостей гранульованих полімерів та проведення досліджень щодо визначення коефіцієнтів зовнішнього тертя та бічного тиску.

В роботі наведено результати експериментальних досліджень у цьому напрямку для деяких гранульованих полімерних матеріалів. Дослідження проводились на установках, конструкції яких розроблено авторами та на які отримано патенти України [5-6].

Було проведено серію експериментів для таких гранульованих полімерів:

- поліетилен високої густини марки Marlex HHM 5502BN;
- співполімер етилену з вінілацетатом (СЕВА) марки 11104 030;

Додайте до списку використаних джерел:

Григорук І.П. Назва роботи. Aktuelle Themen im Kontext der Entwicklung der modernen Wissenschaften : der Sammlung wissenschaftlicher Arbeiten «ЛОГОС» zu den Materialien der internationalen wissenschaftlich-praktischen Konferenz, Dresden, 23 Januar, 2019. Dresden : NGO «Europäische Wissenschaftsplatform», 2019. B. 5. S. ...

Вміст розповсюджується відповідно до ліцензії Creative Commons «Attribution». Копіювання та розповсюдження без зазначення авторства та первинної публікації в даному збірнику заборонено!

ДОДАТОК А6

Патент № 133176 U, МПК G01N 19/02 (2006.01). Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипкого матеріалу/ І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський; заявник Нац. техніч. ун-т України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – заявл 24.10.2018; опубл. 25.03.2019, бюл. № 6.

Бібліографічні дані до патенту на корисну модель # 133176

УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ КОЕФІЦІЄНТА ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ

Бібліографічні дані	Реферат (uk)	Реферат (ru)	Реферат (en)	Опис
Патент на корисну модель очікується перша сплата збору за підтримання чинності 				
(11) 133176	(51) МПК G01N 19/02 (2006.01)			
(24) 25.03.2019				
(21) u201810492	(22) 24.10.2018			
(46) 25.03.2019, бюл. № 6				
(71) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО" (UA)				
(72) Мікульонок Ігор Олегович (UA); Сокольський Олександр Леонідович (UA); Витвицький Віктор Миронович (UA); Бардашевський Сергій Валерійович (UA)				
(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО", просп. Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056 (UA)				
(98) КПІ ім. Ігоря Сікорського, відділ з питань інтелектуальної власності та комерціалізації наукових розробок пр-кт Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056 (UA)				
(54) УСТАНОВКА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ КОЕФІЦІЄНТА ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ				
(57) [немає даних]				

ДОДАТОК А7

Патент № 132798 U, МПК G01N 19/02 (2006.01). Пристрій для визначення величини коефіцієнта зовнішнього тертя сипкого матеріалу / І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, В. М. Витвицький, С. В. Бардашевський; заявник Нац. техніч. ун-т України «КПІ ім. Ігоря Сікорського». – заявл 05.10.2018; опубл. 11.03.2019, бюл. № 5.

Бібліографічні дані до патенту на корисну модель # 132798

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ КОЕФІЦІЄНТА ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ

Бібліографічні дані	Реферат (uk)	Реферат (ru)	Реферат (en)	Опис
Патент на корисну модель				
очікується перша сплата збору за підтримання чинності 				
(11) 132798	(51) МПК			
(24) 11.03.2019	G01N 19/02 (2006.01)			
(21) u201809947	(22) 05.10.2018			
(46) 11.03.2019, бюл. № 5				
(71) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО" (UA)				
(72) Мікульонок Ігор Олегович (UA); Сокольський Олександр Леонідович (UA); Витвицький Віктор Миронович (UA); Бардашевський Сергій Валерійович (UA)				
(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО", просп. Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056 (UA)				
(98) КПІ ім. Ігоря Сікорського, Відділ з питань інтелектуальної власності та комерціалізації наукових розробок пр-кт Перемоги, 37, м. Київ-56, 03056 (UA)				
(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ КОЕФІЦІЄНТА ЗОВНІШНЬОГО ТЕРТЯ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ				
(57) [немає даних]				

ДОДАТОК Б МЕТОД НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ

ТЕКСТ ПРОГРАМИ

(програма складена на мові програмування Qbasic)

```

      ' M N K
CLS
INPUT , n
FOR i = 1 TO n
PRINT "X("; i; ") "
INPUT x
PRINT "Y("; i; ") "
INPUT y
a = a + x: b = b + y: c = c + x ^ 2: d = d + x * y
NEXT
b1 = (a * b - n * d) / (a ^ 2 - n * c)
b0 = (b - b1 * a) / n
PRINT "Y="; b0; "+"; b1; "* X"
1 INPUT , x
IF x = 1111 THEN END
PRINT "Y(X)="; b0 + b1 * x: GOTO 1
END

```

ДОДАТОК В РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ РЕГРЕСІЇ

ДОДАТОК В1 Розрахунок коефіцієнтів регресії для ПВГ

Розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії для побудови рівняння регресії коефіцієнту тертя за формулами (4.2) – (4.4):

$$\begin{aligned}
 b_0 &= (0,482 + 0,511 + 0,477 + 0,489 + 0,447 + 0,433 + 0,461 + 0,464) / 8 = 0,471; \\
 b_1 &= (0,482 + 0,511 + 0,477 + 0,489 - 0,447 - 0,433 - 0,461 - 0,464) / 8 = 0,019; \\
 b_2 &= (0,482 + 0,511 - 0,477 - 0,489 + 0,447 + 0,433 - 0,461 - 0,464) / 8 = -0,002; \\
 b_3 &= (0,482 - 0,511 + 0,477 - 0,489 + 0,447 - 0,433 + 0,461 - 0,464) / 8 = -0,004; \\
 b_4 &= (-0,482 + 0,511 - 0,477 + 0,489 - 0,447 + 0,433 - 0,461 + 0,464) / 8 = 0,004; \\
 b_{12} &= (0,482 + 0,511 - 0,477 - 0,489 - 0,447 - 0,433 + 0,461 + 0,464) / 8 = 0,009; \\
 b_{13} &= (0,482 - 0,511 + 0,477 - 0,489 - 0,447 + 0,433 - 0,461 + 0,464) / 8 = -0,006; \\
 b_{14} &= (-0,482 + 0,511 - 0,477 + 0,489 + 0,447 - 0,433 + 0,461 - 0,464) / 8 = 0,006; \\
 b_{23} &= (0,482 - 0,511 - 0,477 + 0,489 + 0,447 - 0,433 - 0,461 + 0,464) / 8 = -0,001; \\
 b_{24} &= (-0,482 + 0,511 + 0,477 - 0,489 - 0,447 + 0,433 + 0,461 - 0,464) / 8 = 0,001; \\
 b_{34} &= (-0,482 - 0,511 - 0,477 - 0,489 - 0,447 - 0,433 - 0,461 - 0,464) / 8 = -0,471; \\
 b_{123} &= (0,482 - 0,511 - 0,477 + 0,489 - 0,447 + 0,433 + 0,461 - 0,464) / 8 = -0,004; \\
 b_{124} &= (-0,482 + 0,511 + 0,477 - 0,489 + 0,447 - 0,433 - 0,461 + 0,464) / 8 = 0,004; \\
 b_{134} &= (-0,482 - 0,511 - 0,477 - 0,489 + 0,447 + 0,433 + 0,461 + 0,464) / 8 = -0,019; \\
 b_{234} &= (-0,482 - 0,511 + 0,477 + 0,489 - 0,447 - 0,433 + 0,461 + 0,464) / 8 = 0,002; \\
 b_{1234} &= (-0,482 - 0,511 + 0,477 + 0,489 + 0,447 + 0,433 - 0,461 - 0,464) / 8 = -0,009.
 \end{aligned}$$

Розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії для побудови рівняння регресії коефіцієнту бокового тиску:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= (0,340 + 0,310 + 0,348 + 0,280 + 0,344 + 0,347 + 0,348 + 0,291) / 8 = 0,326; \\
 b_1 &= (0,340 + 0,310 + 0,348 + 0,280 - 0,344 - 0,347 - 0,348 - 0,291) / 8 = -0,006; \\
 b_2 &= (0,340 + 0,310 - 0,348 - 0,280 + 0,344 + 0,347 - 0,348 - 0,291) / 8 = 0,009; \\
 b_3 &= (0,340 - 0,310 + 0,348 - 0,280 + 0,344 - 0,347 + 0,348 - 0,291) / 8 = 0,019; \\
 b_4 &= (-0,340 + 0,310 - 0,348 + 0,280 - 0,344 + 0,347 - 0,348 + 0,291) / 8 = -0,019; \\
 b_{12} &= (0,340 + 0,310 - 0,348 - 0,280 - 0,344 - 0,347 + 0,348 + 0,291) / 8 = -0,004; \\
 b_{13} &= (0,340 - 0,310 + 0,348 - 0,280 - 0,344 + 0,347 - 0,348 + 0,291) / 8 = 0,006; \\
 b_{14} &= (-0,340 + 0,310 - 0,348 + 0,280 + 0,344 - 0,347 + 0,348 - 0,291) / 8 = -0,006;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_{23} &= (0,340 - 0,310 - 0,348 + 0,280 + 0,344 - 0,347 - 0,348 + 0,291) / 8 = -0,012; \\
b_{24} &= (-0,340 + 0,310 + 0,348 - 0,280 - 0,344 + 0,347 + 0,348 - 0,291) / 8 = 0,012; \\
b_{34} &= (-0,340 - 0,310 - 0,348 - 0,280 - 0,344 - 0,347 - 0,348 - 0,291) / 8 = -0,326; \\
b_{123} &= (0,340 - 0,310 - 0,348 + 0,280 - 0,344 + 0,347 + 0,348 - 0,291) / 8 = 0,003; \\
b_{124} &= (-0,340 + 0,310 + 0,348 - 0,280 + 0,344 - 0,347 - 0,348 + 0,291) / 8 = -0,003; \\
b_{134} &= (-0,340 - 0,310 - 0,348 - 0,280 + 0,344 + 0,347 + 0,348 + 0,291) / 8 = 0,006; \\
b_{234} &= (-0,340 - 0,310 + 0,348 + 0,280 - 0,344 - 0,347 + 0,348 + 0,291) / 8 = -0,009; \\
b_{1234} &= (-0,340 - 0,310 + 0,348 + 0,280 + 0,344 + 0,347 - 0,348 - 0,291) / 8 = 0,004;
\end{aligned}$$

ДОДАТОК В2 Розрахунок коефіцієнтів регресії для севілену

Розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії для побудови рівняння регресії коефіцієнту тертя за формулами (3.2) – (3.4):

$$\begin{aligned}
b_0 &= (0,596 + 0,612 + 0,417 + 0,425 + 0,507 + 0,515 + 0,457 + 0,483) / 8 = 0,502; \\
b_1 &= (0,596 + 0,612 + 0,417 + 0,425 - 0,507 - 0,515 - 0,457 - 0,483) / 8 = 0,011; \\
b_2 &= (0,596 + 0,612 - 0,417 - 0,425 + 0,507 + 0,515 - 0,457 - 0,483) / 8 = 0,056; \\
b_3 &= (0,596 - 0,612 + 0,417 - 0,425 + 0,507 - 0,515 + 0,457 - 0,483) / 8 = -0,007; \\
b_4 &= (-0,596 + 0,612 - 0,417 + 0,425 - 0,507 + 0,515 - 0,457 + 0,483) / 8 = 0,007; \\
b_{12} &= (0,596 + 0,612 - 0,417 - 0,425 - 0,507 - 0,515 + 0,457 + 0,483) / 8 = 0,004; \\
b_{13} &= (0,596 - 0,612 + 0,417 - 0,425 - 0,507 + 0,515 - 0,457 + 0,483) / 8 = 0,001; \\
b_{14} &= (-0,596 + 0,612 - 0,417 + 0,425 + 0,507 - 0,515 + 0,457 - 0,483) / 8 = -0,001; \\
b_{23} &= (0,596 - 0,612 - 0,417 + 0,425 + 0,507 - 0,515 - 0,457 + 0,483) / 8 = 0,001; \\
b_{24} &= (-0,596 + 0,612 + 0,417 - 0,425 - 0,507 + 0,515 + 0,457 - 0,483) / 8 = -0,001; \\
b_{34} &= (-0,596 - 0,612 - 0,417 - 0,425 - 0,507 - 0,515 - 0,457 - 0,483) / 8 = -0,502; \\
b_{123} &= (0,596 - 0,612 - 0,417 + 0,425 - 0,507 + 0,515 + 0,457 - 0,483) / 8 = -0,003; \\
b_{124} &= (-0,596 + 0,612 + 0,417 - 0,425 + 0,507 - 0,515 - 0,457 + 0,483) / 8 = 0,003; \\
b_{134} &= (-0,596 - 0,612 - 0,417 - 0,425 + 0,507 + 0,515 + 0,457 + 0,483) / 8 = -0,011; \\
b_{234} &= (-0,596 - 0,612 + 0,417 + 0,425 - 0,507 - 0,515 + 0,457 + 0,483) / 8 = -0,056; \\
b_{1234} &= (-0,596 - 0,612 + 0,417 + 0,425 + 0,507 + 0,515 - 0,457 - 0,483) / 8 = -0,035;
\end{aligned}$$

Розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії для побудови регресії коефіцієнту бокового тиску:

$$\begin{aligned}
 b_0 &= (0,309 + 0,262 + 0,246 + 0,218 + 0,311 + 0,252 + 0,292 + 0,268) / 8 = 0,270; \\
 b_1 &= (0,309 + 0,262 + 0,246 + 0,218 - 0,311 - 0,252 - 0,292 - 0,268) / 8 = -0,011; \\
 b_2 &= (0,309 + 0,262 - 0,246 - 0,218 + 0,311 + 0,252 - 0,292 - 0,268) / 8 = 0,014; \\
 b_3 &= (0,309 - 0,262 + 0,246 - 0,218 + 0,311 - 0,252 + 0,292 - 0,268) / 8 = 0,020; \\
 b_4 &= (-0,309 + 0,262 - 0,246 + 0,218 - 0,311 + 0,252 - 0,292 + 0,268) / 8 = -0,020; \\
 b_{12} &= (0,309 + 0,262 - 0,246 - 0,218 - 0,311 - 0,252 + 0,292 + 0,268) / 8 = 0,013; \\
 b_{13} &= (0,309 - 0,262 + 0,246 - 0,218 - 0,311 + 0,252 - 0,292 + 0,268) / 8 = -0,001; \\
 b_{14} &= (-0,309 + 0,262 - 0,246 + 0,218 + 0,311 - 0,252 + 0,292 - 0,268) / 8 = 0,001; \\
 b_{23} &= (0,309 - 0,262 - 0,246 + 0,218 + 0,311 - 0,252 - 0,292 + 0,268) / 8 = 0,001; \\
 b_{24} &= (-0,309 + 0,262 + 0,246 - 0,218 - 0,311 + 0,252 + 0,292 - 0,268) / 8 = -0,007; \\
 b_{34} &= (-0,309 - 0,262 - 0,246 - 0,218 - 0,311 - 0,252 - 0,292 - 0,268) / 8 = -0,270; \\
 b_{123} &= (0,309 - 0,262 - 0,246 + 0,218 - 0,311 + 0,252 + 0,292 - 0,268) / 8 = -0,002; \\
 b_{124} &= (-0,309 + 0,262 + 0,246 - 0,218 + 0,311 - 0,252 - 0,292 + 0,268) / 8 = 0,002; \\
 b_{134} &= (-0,309 - 0,262 - 0,246 - 0,218 + 0,311 + 0,252 + 0,292 + 0,268) / 8 = 0,011; \\
 b_{234} &= (-0,309 - 0,262 + 0,246 + 0,218 - 0,311 - 0,252 + 0,292 + 0,268) / 8 = -0,014; \\
 b_{1234} &= (-0,309 - 0,262 + 0,246 + 0,218 + 0,311 + 0,252 - 0,292 - 0,268) / 8 = -0,013;
 \end{aligned}$$

ДОДАТОК В3 Розрахунок коефіцієнтів регресії для ПВХ

Розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії для побудови рівняння регресії коефіцієнту тертя за формулами (3.2) – (3.4):

$$\begin{aligned}
 b_0 &= (0,568 + 0,583 + 0,398 + 0,405 + 0,483 + 0,491 + 0,435 + 0,460) / 8 = 0,478; \\
 b_1 &= (0,568 + 0,583 + 0,398 + 0,405 - 0,483 - 0,491 - 0,435 - 0,460) / 8 = 0,011; \\
 b_2 &= (0,568 + 0,583 - 0,398 - 0,405 + 0,483 + 0,491 - 0,435 - 0,460) / 8 = 0,053; \\
 b_3 &= (0,568 - 0,583 + 0,398 - 0,405 + 0,483 - 0,491 + 0,435 - 0,460) / 8 = -0,007; \\
 b_4 &= (-0,568 + 0,583 - 0,398 + 0,405 - 0,483 + 0,491 - 0,435 + 0,460) / 8 = 0,007; \\
 b_{12} &= (0,568 + 0,583 - 0,398 - 0,405 - 0,483 - 0,491 + 0,435 + 0,460) / 8 = 0,003; \\
 b_{13} &= (0,568 - 0,583 + 0,398 - 0,405 - 0,483 + 0,491 - 0,435 + 0,460) / 8 = 0,001; \\
 b_{14} &= (-0,568 + 0,583 - 0,398 + 0,405 + 0,483 - 0,491 + 0,435 - 0,460) / 8 = -0,001;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
b_{23} &= (0,568 - 0,583 - 0,398 + 0,405 + 0,483 - 0,491 - 0,435 + 0,460) / 8 = -0,001; \\
b_{24} &= (-0,568 + 0,583 + 0,398 - 0,405 - 0,483 + 0,491 + 0,435 - 0,460) / 8 = 0,001; \\
b_{34} &= (-0,568 - 0,583 - 0,398 - 0,405 - 0,483 - 0,491 - 0,435 - 0,460) / 8 = -0,478; \\
b_{123} &= (0,568 - 0,583 - 0,398 + 0,405 - 0,483 + 0,491 + 0,435 - 0,460) / 8 = -0,003; \\
b_{124} &= (-0,568 + 0,583 + 0,398 - 0,405 + 0,483 - 0,491 - 0,435 + 0,460) / 8 = 0,003; \\
b_{134} &= (-0,568 - 0,583 - 0,398 - 0,405 + 0,483 + 0,491 + 0,435 + 0,460) / 8 = -0,011; \\
b_{234} &= (-0,568 - 0,583 + 0,398 + 0,405 - 0,483 - 0,491 + 0,435 + 0,460) / 8 = -0,053; \\
b_{1234} &= (-0,568 - 0,583 + 0,398 + 0,405 + 0,483 + 0,491 - 0,435 - 0,460) / 8 = -0,034.
\end{aligned}$$

Розраховуємо коефіцієнти рівняння регресії для побудови регресії коефіцієнту бокового тиску:

$$\begin{aligned}
b_0 &= (0,311 + 0,268 + 0,380 + 0,201 + 0,286 + 0,352 + 0,262 + 0,246) / 8 = 0,276; \\
b_1 &= (0,311 + 0,268 + 0,380 + 0,201 - 0,286 - 0,352 - 0,262 - 0,246) / 8 = -0,011; \\
b_2 &= (0,311 + 0,268 - 0,380 - 0,201 + 0,286 + 0,352 - 0,262 - 0,246) / 8 = 0,003; \\
b_3 &= (0,311 - 0,268 + 0,380 - 0,201 + 0,286 - 0,352 + 0,262 - 0,246) / 8 = 0,009; \\
b_4 &= (-0,311 + 0,268 - 0,380 + 0,201 - 0,286 + 0,352 - 0,262 + 0,246) / 8 = -0,009; \\
b_{12} &= (0,311 + 0,268 - 0,380 - 0,201 - 0,286 - 0,352 + 0,262 + 0,246) / 8 = -0,004 \\
b_{13} &= (0,311 - 0,268 + 0,380 - 0,201 - 0,286 + 0,352 - 0,262 + 0,246) / 8 = 0,021; \\
b_{14} &= (-0,311 + 0,268 - 0,380 + 0,201 + 0,286 - 0,352 + 0,262 - 0,246) / 8 = -0,021; \\
b_{23} &= (0,311 - 0,268 - 0,380 + 0,201 + 0,286 - 0,352 - 0,262 + 0,246) / 8 = -0,015; \\
b_{24} &= (-0,311 + 0,268 + 0,380 - 0,201 - 0,286 + 0,352 + 0,262 - 0,246) / 8 = 0,015; \\
b_{34} &= (-0,311 - 0,268 - 0,380 - 0,201 - 0,286 - 0,352 - 0,262 - 0,246) / 8 = -0,276; \\
b_{123} &= (0,311 - 0,268 - 0,380 + 0,201 - 0,286 + 0,352 + 0,262 - 0,246) / 8 = 0,006; \\
b_{124} &= (-0,311 + 0,268 + 0,380 - 0,201 + 0,286 - 0,352 - 0,262 + 0,246) / 8 = -0,006; \\
b_{134} &= (-0,311 - 0,268 - 0,380 - 0,201 + 0,286 + 0,352 + 0,262 + 0,246) / 8 = 0,011; \\
b_{234} &= (-0,311 - 0,268 + 0,380 + 0,201 - 0,286 - 0,352 + 0,262 + 0,246) / 8 = -0,029; \\
b_{1234} &= (-0,311 - 0,268 + 0,380 + 0,201 + 0,286 + 0,352 - 0,262 - 0,246) / 8 = 0,004;
\end{aligned}$$